

C楞瓦楞纸板跌落缓冲包装优化设计

蔡克中¹, 王召霞²

(1. 南昌航空大学, 南昌 330063; 2. 浙江大胜达包装有限公司, 杭州 311215)

摘要: **目的** 研究C楞瓦楞纸板的非线性包装系统在运输过程中的跌落特性, 建立非线性包装产品系统模型, 并得到系统动力学方程。 **方法** 依据物品响应加速度小于许用值及材料用量最小化等2个原则, 进行缓冲包装优化设计并获得最优解。 **结果** 所建立的缓冲模型, 可以直接用于缓冲包装设计。 **结论** 克服了用最大加速度-静应力曲线来设计缓冲包装需要大量实验和较多数据的弊端, 为其他缓冲材料在缓冲包装设计中提供一般方法。

关键词: C楞瓦楞纸板; 跌落; 缓冲; 冲击

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)21-0025-02

Optimization Design of C-flute Corrugated Cardboard Packaging System Drop Cushion

CAI Ke-zhong¹, WANG Zhao-xia²

(1. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Zhejiang Great Shengda Packing Co., Ltd., Hangzhou 311215, China)

ABSTRACT: **Objective** The Drop characteristics of nonlinear packaging system were studied under the C-flute corrugated paperboard in the transport process, the dynamical model of the system was developed, and the numerical results of the dynamical equations were obtained. **Methods** According to item response acceleration is less than the allowable value and the amount of material to minimize the two principles, the optimization design of cushioning packaging and obtain the optimal solution. **Results** It is shown that this method is better than the maximum acceleration-static stress curves that need more test and data in designing cushioning packaging. **Conclusion** The results lead to some insights into design of cushioning packaging.

KEY WORDS: C-flute corrugated paperboard; drop; cushion; impact

包装产品在运输过程中, 缓冲材料对包装件起到防护作用。绝大部分包装材料具有非线性特性^[1-5], 例如瓦楞纸板具有强度高、成本低、品种多样、便于回收利用等特点, 被广泛用作缓冲包装材料^[6-7]。许多学者对瓦楞纸板的力学性能进行了研究, Sek^[8]提出了利用动态因子预测瓦楞纸板的缓冲性能。卢富德^[9-10]通过对串联瓦楞纸板的性能研究, 提出了求解方法。Rouillard对瓦楞纸板进行预压处理, 并将其力学性能和未经预压的瓦楞纸板性能进行了对比, 得出经预压的瓦楞纸板缓冲性能优于未经预压的瓦楞纸板。上

述文献针对瓦楞纸板的缓冲性能进行了研究, 但没有将其应用到实际缓冲包装系统中。文中基于C楞瓦楞纸板的本构模型, 针对C楞瓦楞纸板缓冲包装系统的跌落冲击响应, 研究C楞瓦楞纸板的缓冲特性, 为缓冲材料在工程隔振设计中提供一般方法。

1 C楞瓦楞纸板缓冲包装系统模型

文中针对C楞瓦楞纸板包装系统在运输过程中的跌落缓冲过程进行研究, 其模型见图1。

收稿日期: 2014-08-20

作者简介: 蔡克中(1976—), 男, 江西玉山人, 硕士, 南昌航空大学副教授, 主要研究方向为设计理论与方法。

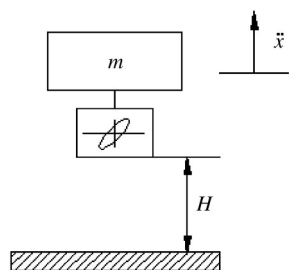


图1 EPE非线性跌落模型

Fig.1 Nonlinear drop model of the EPE

由C楞瓦楞纸板的本构模型^[12]可算出动力学方程:

$$m\ddot{x} + A \left\{ a_1 \frac{x}{h} + a_2 \sin\left(\frac{a_3 x}{h}\right) + a_4 \tan\left(\frac{a_5 x}{h}\right) + a_6 \frac{\dot{x}}{h} \right\} = 0 \quad (1)$$

初始条件: $x=0, \dot{x} = \sqrt{2gH}$ 。

式中: m 为包装件质量; A 为缓冲材料面积; $a_1=0.301$ MPa, $a_2=0.15$ MPa, $a_3=7.004$ rad, $a_4=0.03$ MPa, $a_5=1.93$ rad, $a_6=50.8$ Pa·s。

给定包装件质量、结构尺寸、跌落高度 H , 及其所能承受的最大加速度 G_m , 对此进行优化缓冲设计。需要考虑易损件最大加速度响应值必须小于 G_m , 且材料的用量最省。由于瓦楞纸板厚度是一定的, 在设计缓冲结构尺寸时, 瓦楞纸板的面积 A 为唯一的变量, 根据优化条件, 建立其优化目标函数:

$$\begin{cases} \min(F(x)) = A \\ \text{满足} \begin{cases} \min(G) = \frac{G_m}{n_s} \\ 0 < A \leq A_0 \\ h > 0 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: G 为包装件无量纲加速度; G_m 为包装件无量纲最大加速度; A_0 为包装件的最大底面积; n_s 为安全系数; x 为设计变量, $x=[A]$ 。目标函数有不等式约束条件, 进行无约束优化, 构造内点型混合罚函数为:

$$T(x, \mu_k) = F(x) + \mu_k \sum \left(\frac{1}{A} - \frac{1}{A - A_0} \right) + \frac{1}{\sqrt{\mu_k}} \left(\min(G) - \frac{G_m}{n_s} \right)^2 \quad (3)$$

2 结果及分析

采用上述模型进行缓冲包装优化设计, 例如一个

包装商品质量为 1 kg, 底面积 A 为 0.06 m^2 , 从 0.6 m 的高度落下, 商品易损度 G_m 为 240, 设计安全系数 n_s 为 1.2, C楞瓦楞纸板的厚度 h 为 5 mm。

运用内点混合罚函数方法, 取初始点 $y_0=0.006$, 罚因子 $r_0=2$, 缩小系数 $c=0.5$, 精度 $\delta=10^{-4}$, 得到优化解 k (0.081, 236.3115)。随着衬垫面积 A 的增大, 物品加速度响应呈快速下降趋势, 但是衬垫面积 A 增大到一定程度后, 物品最大加速度响应会出现一个拐点, 然后大幅度上升, 见表 2。计算中假设在整个跌落过程, 即从缓冲衬垫被压缩到最大至反弹到原始厚度过程中, 包装件和 C楞瓦楞纸板缓冲衬垫紧密接触不分离, 这样物品在缓冲过程中的加速度见图 3, 图中出现 2 个近似半正弦波, 这是由于瓦楞纸板在冲击过程中出现 2 次破坏的缘故。

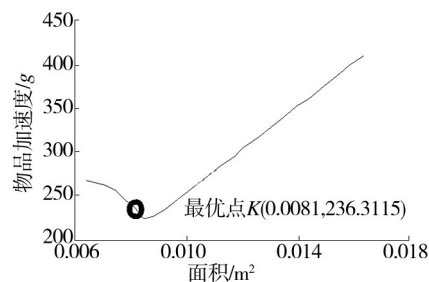


图2 无量纲最大加速度值与C楞瓦楞纸板面积的关系

Fig.2 The relationship between dimensionless maximum acceleration and area of C-flute corrugated paperboard

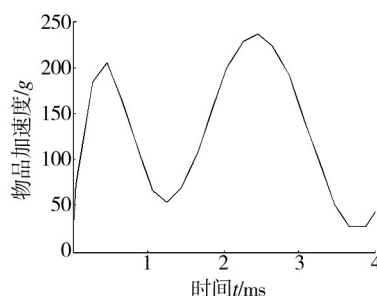


图3 无量纲最大加速度-时间曲线

Fig.3 Dimensionless maximum acceleration-time

3 结语

基于C楞瓦楞纸板本构理论, 建立了C楞瓦楞纸板缓冲包装系统跌落冲击模型。分析了C楞瓦楞纸板结构尺寸对包装件的影响。结果表明, 小幅度地增加物品面积对响应产生较大的影响。根据优化设计方法,

(下转第75页)

GONG Jian-xun, LIU Zheng-yi, QIU Wan-qi, et al. Vacuum Evaporated Poly(Vinyl Alcohol) Thin Films[J]. Vacuum Science and Technology, 2004(5):359—362.

- [13] 马运柱,崔鹏,刘文胜,等. SnAgCu合金粉末的真空蒸镀涂层机理[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(2):188—191.

MA Yun-zhu, CUI Peng, LIU Wen-sheng, et al. Film Formation Mechanism of Coated SnAgCu Alloy Powders via Vacuum Evaporation[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(2):188—191.

- [14] 黄剑锋,王艳,曹丽云,等. 蒸镀法制备 ZnS 光学薄膜研究

[J]. 稀有金属材料与工程, 2009(s1):490—492.

HUANG Jian-feng, WANG Yan, CAO Li-yun, et al. Research of ZnS Optical Thin Film via Evaporation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009(s1):490—492.

- [15] 谭辉,陶明德. 非晶薄膜厚度与电阻率的关系[J]. 功能材料, 1985(5):279—283.

TAN Hui, TAO Ming-de. Relationship between Layer Thickness and Resistivity of Amorphous Film[J]. Journal of Functional Materials, 1985(5):279—283.

(上接第 26 页)

得出瓦楞纸板最优缓冲面积,克服了利用缓冲曲线设计包装结构需要大量试验数据的弊端,为瓦楞纸板包装结构优化设计提供有效的方法。

参考文献:

- [1] YU Da, KWAK J B, SEUNGBAE P, et al. Dynamic Responses of PCB under Product-level Free Drop Impact[J]. Microelectronics Reliability, 2010(50):1028—1038.

- [2] 卢富德,高德. 考虑蜂窝纸板箱缓冲作用的产品包装系统跌落冲击研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(3):335—341.

LU Fu-de, GAO De. Study on Drop Impact of Packaging System Considering the Cushioning Action of Honeycomb Paperboard Box[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(3):335—341.

- [3] 卢富德,高德. 功能梯度泡沫动力学响应分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(15):54—57.

LU Fu-de, GAO De. Dynamic Response of a Functionally Graded Foam Structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(15):54—57.

- [4] 卢富德,高德,梁爱锋. 立方非线性双层包装在矩形方波冲击下破损边界曲线的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(12):7—10.

LU Fu-de, GAO De, LIANG Ai-feng. Study of Damage Boundary Curve of Cubic Non-linear Double Layer Package under Rectangular Pulse[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12):7—10.

- [5] 卢富德,刘雄建,高德. 多胞缓冲材料本构模型与应用进展[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(7):1336—1334.

LU Fu-de, LIU Xiong-jian, GAO De. Review of Constitutive Model and Its Application of Cellular Cushioning Material[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(7):1336—1344.

- [6] LU Fu-de, GAO De. Impact Responses of Composite Cushioning System Considering Critical Component with Simply Supported Beam Type[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(56):1—5.

- [7] LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Virtual Mass Method for Solution of Dynamic Response of Composite Cushioning Packaging System[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26(S1):32—42.

- [8] SEK M, KIRKPATRICK J. Prediction of the Cushioning Properties of Corrugated Fibreboard from Static and Quasi-dynamic Compression Data[J]. Packaging Technology and Science, 1997, 10(2):87—94.

- [9] 卢富德,陶伟明,高德. 串联缓冲结构压缩响应虚拟质量分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(8):1431—1436.

LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Compression Responses of Series Cushioning Structures by a Virtual Mass Method[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(8):1431—1436.

- [10] 卢富德,陶伟明,高德. 串联缓冲系统冲击响应与结构优化分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(10):1773—1777.

LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Impact Response of Series Cushioning System and Structure Optimization Analysis[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(10):1773—1777.

- [11] ROUILLARD V, SEK M A. Behaviour of Multi-layered Corrugated Paperboard Cushioning Systems under Impact Loads[J]. Strain, 2007, 43(4):345—347.

- [12] 卢富德,陶伟明,高德. 瓦楞纸板串联缓冲系统动力学响应[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21):30—32.

LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Dynamic Response of a Series Cushioning Packaging System Made of Multi-layer Corrugated Paperboard[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21):30—32.