

EPS 泡沫与 C 楞瓦楞纸板串联系统的缓冲分析与应用

杨凌云¹, 郭勇², 吴淑芳³

(1. 浙江经贸职业技术学院, 杭州 310018; 2. 浙江中能工程检测有限公司, 杭州 311106; 3. 浙江长征职业技术学院, 杭州 310023)

摘要: 基于发泡聚苯乙烯(EPS)和瓦楞纸板的本构关系,建立了由物品与这2种材料组成内外包装系统的缓冲模型;进而对工程实例进行了优化设计,介绍了串联模型的具体应用。研究表明,在缓冲工程设计中不应忽略外包装的“串联”缓冲作用,否则会导致过度包装。

关键词: 发泡聚苯乙烯; 瓦楞纸板; 串联系统; 冲击

中图分类号: TB484; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)07-0010-03

Cushioning Analysis and Application of EPS and C-flute Corrugated Paperboard Series Packaging System

YANG Ling-yun¹, GUO Yong², WU Shu-fang³

(1. Zhejiang Economic & Trade Polytechnic, Hangzhou 310018, China; 2. Hangzhou Zhongneng Construction Detection Limited Company, Hangzhou 310000, China; 3. Zhejiang Changzheng Vocational & Technical College, Hangzhou 310023, China)

Abstract: On the basis of constitutive relationships of expanded polystyrene (EPS) and C-flute corrugated paperboard (CCP), the cushioning mathematical model of goods and exterior and interior packaging composed by the two kinds of material was established. Optimal design was carried out on engineering project and application of the series model was introduced. The results showed the series cushioning effect of exterior packaging should not be neglected in engineering design; otherwise, over packaging will happen.

Key words: expanded polystyrene; corrugated paperboard; series system; impact

发泡聚苯乙烯和瓦楞纸板是现阶段应用最广的2种包装材料。基于现代包装功能要求的提高及包装轻量化、低碳降耗的需求,国内外对发泡类衬垫材料和瓦楞纸板、蜂窝纸板的缓冲防护性能进行了比较多的研究。一些学者对发泡材料的缓冲性能^[1-2]、本构模型^[3-4]及有限元方法^[5-6]进行了一系列的研究;在纸质缓冲结构方面,一些国外学者主要采用实验方法分析瓦楞纸板等材料的缓冲性能^[7-8];高德等人提交了瓦楞纸板力学本构关系的研究成果^[9-10]。

以上研究是基于单一缓冲材料为对象,而相当多的包装系统均由发泡塑料缓冲材料与纸质外包装箱共同起到商品的保护作用,但在设计计算中外包装的

作用却被忽略了。2012年,卢富德等人^[11-13]提出了多层瓦楞纸板组成的串联力学模型新概念,并首次引入虚拟质量,研究了串联缓冲系统冲击响应规律。笔者以发泡聚苯乙烯与C楞瓦楞纸板为对象,用所建立的串联模型获得了有助于优化缓冲结构、降低包装材料消耗的有价值结论。

1 发泡聚苯乙烯与瓦楞纸板串联模型

在文献[11]中,发聚苯乙烯材料的本构关系为:

$$f_1(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = [a_1 \tanh(a_2 \varepsilon) + a_3 \tan(a_4 \varepsilon) + a_5 \varepsilon](1 + a_6 \dot{\varepsilon} + a_7 \dot{\varepsilon}^2) + a_8 \dot{\varepsilon} \quad (1)$$

收稿日期: 2013-01-08

基金项目: 国家“十二五”科技支撑项目(2011BAD24B01)

作者简介: 杨凌云(1976-),女,湖北随州人,硕士,浙江经贸职业技术学院讲师,主要研究方向为包装动力学与计算机分析。

式中: $a_1=0.0583$ MPa, $a_2=18.5$ rad, $a_3=0.0493$ MPa, $a_4=1.84$ rad, $a_5=0.0456$ MPa, $a_6=0.0011$ s, $a_7=2 \times 10^{-5}$ s², $a_8=11$ Pa/s。

在文献[10]中,初始厚度为 4.4 mm 的 C 楞瓦楞纸板的本构模型关系式为:

$$f_2(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = b_1 \varepsilon + b_2 \varepsilon^2 + b_3 \varepsilon^3 + b_4 \varepsilon^4 + b_5 \varepsilon^5 + b_6 \tan(b_7 \varepsilon) + b_8 \dot{\varepsilon} + b_9 \dot{\varepsilon}^2 \quad (2)$$

式中: $b_1=1.4845$ MPa; $b_2=-1.1090$ MPa; $b_3=-6.6793$ MPa; $b_4=7.3762$ MPa; $b_5=0.9153$ MPa; $b_6=0.0159$ MPa; $b_7=1.93$ rad; $b_8=102.1$ Pa · s, $b_9=0.033$ Pa · s²。

在图 1 所示串联包装跌落冲击简图中,代表包装物品的 m 从 H 高程落在发泡聚苯乙烯与 C 楞瓦楞纸板所组成的串联包装系统上。 y_1 表示物品跌落运动方向; y_2 建在内外包装的界面处,表示瓦楞纸板界面处运动随时间的变化规律。

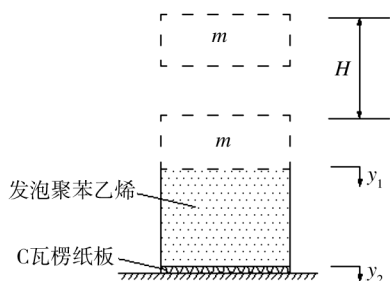


图 1 考虑外包装的跌落冲击示意图

Fig. 1 Schematic diagram of packaging system considering the action of exterior packaging

由牛顿第二定律,得到缓冲包装系统运动方程为:

$$m\ddot{y}_1 + Af_1\left(\frac{y_1 - y_2}{h_1}, \frac{\dot{y}_1 - \dot{y}_2}{h_1}\right) = 0 \quad (3)$$

式中: h_1 为泡沫的厚度; A 为缓冲面积。

式(3)的边界条件及初始条件分别为:

$$f_1\left(\frac{y_1 - y_2}{h_1}, \frac{\dot{y}_1 - \dot{y}_2}{h_1}\right) = f_2\left(\frac{y_2}{h_2}, \frac{\dot{y}_2}{h_2}\right) \quad (4)$$

$$\dot{y}_1(0) = \dot{y}_2(0) = \sqrt{2gH}; y_1(0) = y_2(0) = 0 \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度,取 9.8 m/s²; h_2 为瓦楞纸板的厚度,由方程(3)–(5)所组成的方程组,即为 C 楞瓦楞纸板与 EPS 泡沫所组成的串联系统的冲击模型。

2 实例佐证分析

某包装件的外包装为 C 楞瓦楞纸板箱,缓冲衬垫

采用发泡聚苯乙烯,内装商品 $m=7$ kg,易损度 $G_m=120$,最大底面积 $A_0=0.015$ m²。设计时取跌落高度 $H=0.5$ m,要求当安全系数 n_s 为 1.2 时,确定该包装缓冲材料的最佳用量。

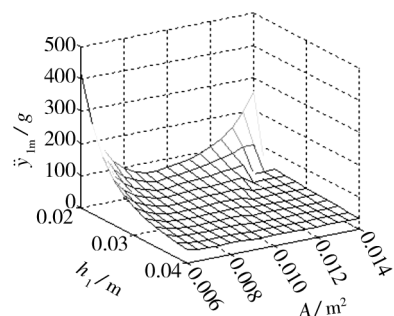
以缓冲材料体积最小为最优目标,并满足一定的限制性条件,设计目标优化数学函数 F 为:

$$\begin{cases} F = A \cdot h_1 \\ \text{s. t. : } \ddot{y}_{1m} \leq \frac{G_m}{n_s} \\ 0 < A < A_0 \\ h_1 > 0 \end{cases} \quad (6)$$

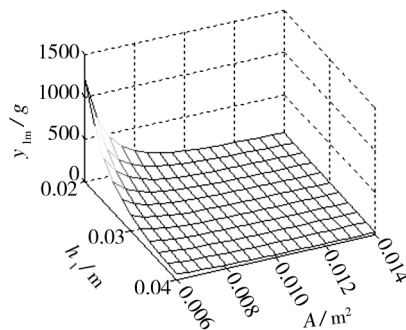
式中: A_0 为被包装物最大底面积; n_s 为安全系数; $\ddot{y}_{1m}$ 为跌落冲击时的最大响应加速度。

运用文献[12]的优化方法,得发泡聚苯乙烯的优化解为: $h_1=0.02$ m, $A=0.008$ m²,最大加速度, $F=1.6 \times 10^{-4}$ m³。

对于由式(3)、(4)与(5)所组成的串联模型,给定厚度 h_1 及面积 A ,即可得到产品在受到冲击工程中的最大加速度响应值。图 2 给出了 $h_1=0.017 \sim 0.04$



a 考虑瓦楞纸板



b 未考虑瓦楞纸板

图 2 最大加速度与缓冲材料尺寸的关系

Fig. 2 Relationship between maximum acceleration and dimensions of cushion material

$m, A=0.006 \sim 0.014$ m² 范围内,最大加速度 $\ddot{y}_{1m}$ 与材料尺寸之间的关系。

运用与串联系统模型同样方法,不考虑瓦楞纸板

时发泡聚苯乙烯的优化尺寸为: $h_1 = 0.022$ m, $A = 0.0095$ m², 最大加速度 $\ddot{y}_{1m} = 97.61$ g, $F = 2.09 \times 10^{-4}$ m³。从图 2b 可见在 $h_1 = 0.017 \sim 0.04$ m, $A = 0.006 \sim 0.014$ m² 范围内, 最大加速度 $\ddot{y}_{1m}$ 与材料尺寸之间的关系。

可知在考虑与不考虑瓦楞纸板缓冲作用的 2 种工况下, 缓冲材料用量相差达 30.62%。

为证明上述串联力学模型的正确性, 选厚度 0.02 m, 截面尺寸为 8 cm×10 cm 的发泡聚苯乙烯材料。C 楞厚度为 4.4 mm。用 7 kg 的重锤在 0.5 m 高程自由落下, 得到包装系统加速度-时间曲线试验值。在图 3 中列入了由式(3)-(5)得到的包装系统加速度-时间

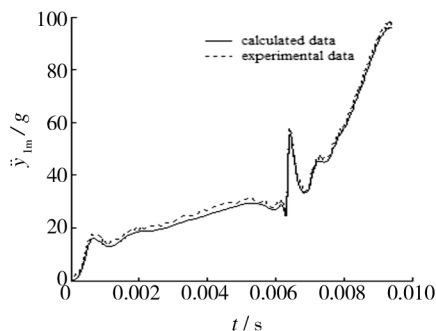


图3 试验与理论曲线对比

Fig. 3 Comparison between calculated and experimental data of acceleration-time curve

计算曲线(实线)和实验曲线(虚线)。最大加速度的计算值和试验值分别为 96.03 g, 98.89 g, 两者相对差 2.89%。这说明采用的优化计算方法是符合包装工程上设计要求的。

3 结论

论述了发泡聚苯乙烯与瓦楞纸板串联承载的力学模型和计算方法, 并将其成功应用于具体的包装结构设计。算例表明, 是否考虑瓦楞纸板外包装的缓冲保护作用, 缓冲材料的耗用量差异显著。该理论将有效提高包装结构设计的科学性, 可望在包装轻量化、节能降耗中产生重要的经济与社会效益。

参考文献:

- [1] CHEN W, LU F, WINFREE N. High-strain-rate Compressive Behavior of a Rigid Polyurethane Foam with Various Densities[J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42(1): 65-73.
- [2] SAHA M C, MAHFUZ H, CHAKRAVARTY U K, et al. Effect of Density, Microstructure, and Strain Rate on Compression Behavior of Polymeric Foams[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 406(1-2): 328-336.
- [3] AVALLE M, BELINGARDI G, IBBA A. Mechanical Models of Cellular Solids: Parameters Identification from Experimental Tests[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(1): 3-27.
- [4] 高德, 卢富德. 聚乙烯缓冲材料多自由度跌落包装系统优化设计[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(3): 69-72.
GAO De, LU Fu-de. Optimization Design of MDOF Package Cushioning System Made of Polyethylene[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(3): 69-72.
- [5] LOW K H. Drop-impact Cushioning Effect of Electronics Products Formed by Plates[J]. *Advances in Engineering Software*, 2003, 34(1): 31-50.
- [6] UMUD E O, GUNAY A. Finite Element Analysis of Expanded Polystyrene Foam under Multiple Compressive Loading and Unloading[J]. *Materials and Design*, 2011, 32(2): 773-780.
- [7] GARCIA-ROMEY-MARTINEZ M A, SEK M A, CLOQUELL-BALLESTER V A. Effect of Initial Pre-compression of Corrugated Paperboard Cushions on Shock Attenuation Characteristics in Repetitive Impacts[J]. *Packaging Technology and Science*, 2009, 22(6): 323-334.
- [8] WANG Dong-mei, WANG Zhi-wei. Experimental Investigation into the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard[J]. *Packaging Technology and Science*, 2008, 21(6): 309-316.
- [9] 高德, 王振林, 陈乃立, 等. B 楞双层瓦楞纸板衬垫平压缓冲动态性能建模[J]. *振动工程学报*, 2001, 14(2): 172-177.
GAO De, WANG Zhen-lin, CHEN Nai-li, et al. The Dynamic Modeling of Flat Compression Cushioning Made up of B-flute Double-wall Corrugated Fiberboard[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2001, 14(2): 172-177.
- [10] 卢富德, 高德. C 楞瓦楞纸板动态缓冲模型及应用[J]. *功能材料*, 2012, 43(1): 39-41.
LU Fu-de, 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.
- [11] LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Virtual Mass Method for Solution of Dynamic Response of Composite Cushion Packagingsystem[J]. *Packaging Technology and Science*, 2012, in press.

量编码器。在每次开机都要进行原点回归操作,工作模式根据现场条件和工艺要求选择合适的原点回归模式^[9]。各机组位置调节原理是^[10]:伺服电机带动外部多级齿轮,齿轮牵引丝杆带动负载移动。假设外部多级齿轮与电机的齿轮等效比为: N/M (该值为固定值),丝杆的螺距为 a ,DVP10MC 运动控制器的伺服齿轮比(电子齿轮比分子/电子齿轮比分母) A/B 。电机转一圈的外部输入脉冲为: $1\ 280\ 000 \cdot B/A$,由此可以得出丝杆偏移量分辨率为: $(Ma/1000N) \cdot (A/1\ 280\ 000B)$ mm。由于 N/M 为固定值,则调节伺服齿轮比 A/B 的值来控制丝杆偏移量的分辨率。在精装联动控制系统中,各调节位置的丝杆以及外部齿轮等效比存在差异的,排除外界干扰因素如机械设备等位置调节的偏移量,分辨率控制在 0.2 mm 范围内就可以达到控制的要求。

4 结论

针对精装联动线的现场工艺以及设计规则,设计了基于以太网的精装联动线控制系统。该系统采用以太网主干通信网,结构简单;DVP10MC 多轴运动控制器的使用,解决了系统中多轴的需求,简化了系统的设计;同时选型上采用台达系列的产品,降低了研发成本。着重介绍了精装联动线机组间的通信实现过程与机组中位置调节的计算方式。从整体来说,该系统设计方案设计合理。

参考文献:

- [1] 荣华阳. 如何在书刊装订领域占据强势地位[J]. 印刷技术, 2011(4): 80-81.
RONG Hua-yang. How to Occupy a Dominant Position in the Book Binding Field[J]. Printing Technology, 2011(4): 80-81.
- [2] 张继东, 张卫东, 许晓鸣. 现场总线与以太网互联研究[J]. 计算机工程, 2001, 27(1): 19-21.
ZHANG Ji-dong, ZHANG Wei-dong, XU Xiao-ming. Research of Fieldbus Interconnection with Ethernet[J]. Computer Engineering, 2001, 27(1): 19-21.
- [3] 印刷工业出版社编辑部. 印后加工工艺[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2011.
The Editorial Department of Graphic Communications Press. Process Printing[M]. Beijing: Graphic Communications Press, 2011.
- [4] 沈青, 桂卫华, 杨铁军. 基于工业以太网的实时控制性能分析[J]. 计算工程, 2007, 33(1): 233-235.
SHEN Qing, GUI Wei-hua, YANG Tie-jun. Real-time Control Performance Analysis Based on Industrial Ethernet[J]. Computer Engineering, 2007, 33(1): 233-235.
- [5] 孙培德, 张志杰, 刘晓洁. 现代运动控制技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
SUN Pei-de, ZHANG Zhi-jie, LIU Xiao-jie. Modern Motion Control Technology and Its Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [6] Modbus Application Protocol Specification V1.1b. (余不详)
- [7] Modbus Messaging on Tcp/Ip Implementation Guide V1.0b. (余不详)
- [8] 周国平, 申冬琴. 基于 PLC 的壁纸包装控制系统设计[J]. 包装工程, 2012, 33(9): 108-110.
ZHOU Guo-ping, SHEN Dong-qin. Design of Wallpaper Packaging Control System Based on PLC[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9): 108-110.
- [9] 杨威启, 常宗瑜. 机电工程控制基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
YANG Xian-qi, CHANG Zong-yu. Fundamentals of Mechanical and Electrical Engineering Control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [10] 厉虹, 杨黎明, 艾红. 伺服技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
LI Hong, YANG Li-ming, AI Hong. Servo Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [12] 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.
- [13] 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.

(上接第 12 页)