

层状泡沫缓冲系统优化设计

何育朋¹, 李东华², 张慧²

(1. 西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2. 北方华安工业集团有限公司, 齐齐哈尔 161046)

摘要: **目的** 研究发泡聚苯乙烯和发泡聚苯乙烯所组成的层状缓冲系统的响应。**方法** 基于试验数据分别得到发泡聚苯乙烯与发泡聚苯乙烯的本构关系, 然后根据它们的本构关系, 建立发泡聚苯乙烯与发泡聚苯乙烯串联系统跌落冲击模型, 并运用Newton-Raphson方法得到串联结构的冲击响应。最后, 用算例介绍求解最优化串联包装结构的过程, 得到最优化包装结构。**结果** 加速度-时间曲线的计算值与试验结果相吻合。**结论** 所提出的优化方法为其他串联结构优化设计提供了参考。

关键词: 发泡聚苯乙烯; 发泡聚苯乙烯; 本构关系; 优化设计

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)17-0019-03

Optimization Design of Packaging Structure with Cushion Function

HE Yu-peng¹, LI Dong-hua², ZHANG Hui²

(1. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China;

2. North Hua'an Industrial Group Co., Ltd., Qiqihar 161046, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the optimization design of laminated plastic foam system made of expanded polystyrene (EPS) and expanded polyethylene (EPE). **Methods** Based on experimental data, the constitutive relationships of EPS and EPE were identified respectively. According to their constitutive models, the drop impact model of EPS in series with EPE was established and solved by Newton-Raphson iteration method. Finally, the solving process of serial packaging structure optimization was introduced using numerical examples, and the optimal packaging structure was obtained. **Results** The calculated acceleration-time curve agreed well with the experimental data. **Conclusion** The serial method in this paper offers reference for other serial structures in solving dynamic responses.

KEY WORDS: expanded polystyrene (EPS); expanded polyethylene (EPE); constitutive models; optimal design

现有包装动力学是基于单一理想力学模型或单一缓冲材料。针对单一理想力学模型, Wang等人^[1]介绍了双曲非线性系统跌落冲击响应规律, 高德等人^[2-3]研究了正切非线性包装系统的转动及平动响应, 卢富德等人^[4]研究了立方非线性包装系统的冲击响应。针对实际缓冲材料, Lu等人^[5]建立了发泡聚苯乙烯的本构模型, 为发泡聚苯乙烯包装系统的优化设计奠定了理论基础。卢富德等人^[5-6]建立了瓦楞纸板的动态本构模型来研究蜂窝纸板的缓冲性能。高德等人研究了发泡聚苯乙烯系统冲击响应^[7], 并得到了系统的最优解。

以上方法为不同缓冲材料组成的串联结构的冲击响应与优化设计提供了方法, 鉴于此, 文中研究发泡聚苯乙烯和发泡聚苯乙烯所组成的层状缓冲系统响应与实际应用。

1 发泡聚苯乙烯与发泡聚乙模型

实验材料为发泡聚苯乙烯和发泡聚乙, 发泡聚苯乙烯的密度为 0.033 g/cm^3 , 发泡聚乙的密度为 0.029 g/cm^3 , 材料尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。采用液压

收稿日期: 2014-05-21

作者简介: 何育朋(1986—), 男, 陕西咸阳人, 助理工程师, 主要研究方向为设备管理和采购。

万能试验机测试材料的静态应力-应变数据,压缩速度为2 mm/min。材料动态实验采用跌落试验台(苏州试验机厂,DL100型),压缩速度为10 mm/min,得到发泡聚苯乙烯的静态数据,见图1虚线。

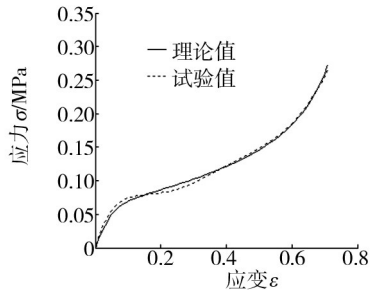


图1 发泡聚苯乙烯静态应力-应变曲线理论值与试验值对比
Fig.1 Comparison between calculated and experimental static stress-strain curve

用 $\sigma = a_1 \tan(a_2 \varepsilon) + a_3 \varepsilon$ 表示缓慢变化的平台, $a_3 \tan(a_4 \varepsilon)$ 表示材料的压实阶段。EPS 材料的静态本构模型为:

$$\sigma = a_1 \tan(a_2 \varepsilon) + a_3 \tan(a_4 \varepsilon) + a_5 \varepsilon \quad (1)$$

式中: a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 为待识别参数。

运用最小二乘法,得到发泡聚苯乙烯静态本构模型中的参数: $a_1=0.0583$ MPa, $a_2=18.5$ rad, $a_3=0.0493$ MPa, $a_4=1.84$ rad, $a_5=0.0456$ MPa。

质量为10 kg的重锤从跌落高度为0.6 m处落在厚度为4 cm的EPS上,得到EPS动态应力-应变曲线,见图2虚线。

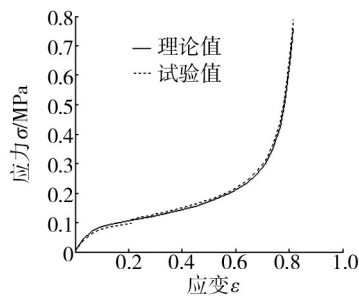


图2 发泡聚苯乙烯静态应力-应变曲线理论值与试验值对比
Fig. 2 Comparison between calculated and experimental dynamic stress-strain curve

提出发泡聚苯乙烯的动态本构模型为:

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

运用最小二乘法,得到: $a_6=0.0011$ s, $a_7=2 \times 10^{-5}$ s²; $a_8=11$ Pa·s。

运用同样的步骤,得到发泡聚乙烯本构关系为:

$$f_2(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = b_1 \dot{\varepsilon} + b_2 \tan(b_3 \varepsilon) \quad (3)$$

式中: $b_1=35.47$ Pa/s, $b_2=0.02$ MPa, $b_3=1.92$ rad。

3 发泡聚苯乙烯与发泡聚乙烯串联模型

建立EPS与EPE串联力学模型,见图3。包装产品从高度为 H 的地方落在EPS与EPE串联的缓冲系统中,坐标 y_1 用来表示包装产品的运动,坐标 y_2 建在EPS与EPE的交接面上,表示交接面的运动。整个系统中EPS的厚度为 h_1 ,EPE的厚度为 h_2 ,EPS与EPE的面积为 A 。

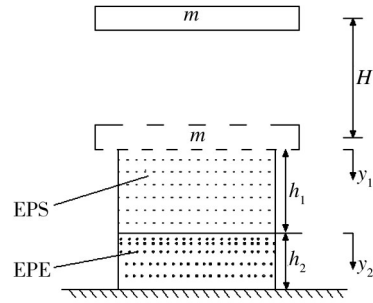


图3 EPE与EPS串联包装系统示意

Fig.3 Diagram of serial packaging system of EPE and EPS

由牛顿第二定律得缓冲包装系统运动方程为:

$$m\ddot{y} + A \cdot f_1\left(\frac{y_1 - y_2}{h_1}, \frac{\dot{y}_1 - \dot{y}_2}{h_1}\right) = 0 \quad (4)$$

在图3所示的模型中,交界面处的边界条件为:

$$f_1\left(\frac{y_1 - y_2}{h_1}, \frac{\dot{y}_1 - \dot{y}_2}{h_1}\right) = f_2\left(\frac{y_2}{h_2}, \frac{\dot{y}_2}{h_2}\right) \quad (5)$$

方程(4)的初始条件为:

$$\dot{y}_1(0) = \dot{y}_2(0) = \sqrt{2gH}; y_1(0) = y_2(0) = 0 \quad (6)$$

式中: H 为跌落高度; g 为重力加速度(取值9.8 m/s²)。

运用Newton-Raphson迭代算法,可求解公式(4)与(5)组成的方程组。

根据参考文献[9],设计目标优化数学模型为:

$$\begin{cases} F(A, h_1, h_2) = (\gamma A h_2 + A h_1) \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{满足: } \dot{y}_{1m} \leq \frac{G_m}{n_s} \\ 0 < A \leq A_0 \\ h_1 > 0, h_2 > 0 \end{array} \right. \end{cases} \quad (7)$$

式中: A_0 为包装物品的最大底面积; n_s 为安全系数; $\ddot{y}_{1m}$ 为质量块的最大响应加速度; γ 为发泡聚乙烯与发泡聚苯乙烯单位体积价格比。

4 包装应用实例

EPS与EPE串联缓冲包装系统质量 $m=6\text{ kg}$,包装产品从高度 $H=0.6\text{ m}$ 处落在串联的缓冲系统上,物品易损度 G_m 为 90 g (g 取 9.8 m/s^2)。设计要求安全系数 n_s 为 1.2 ,包装产品最大底面积 A_0 为 0.013 m^2 ,EPE与EPS单位体积价格比 $\gamma=3$,求出最优化的缓冲包装结构。

运用文献[9—10]提出的计算方法,得到缓冲材料的优化解为: $h_1=0.028\text{ m}$, $h_2=0.01\text{ m}$, $A=0.007\text{ m}^2$ 。最大加速度 $\ddot{y}_{1m}=72.51\text{ g}$, $F=4.06\cdot 10^{-4}\text{ m}^3$, $A=0.007\text{ m}^2$, h_2 为 $0.01\sim 0.04\text{ m}$, h_1 为 $0.01\sim 0.04\text{ m}$ 时,最大加速度 $\ddot{y}_{1m}$ 与材料尺寸之间的关系见图4。

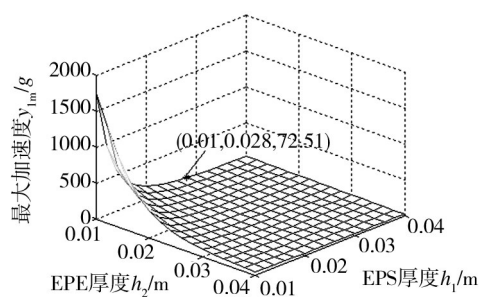


图4 最大加速度与缓冲材料尺寸的关系

Fig.4 Relationship between maximum acceleration and dimensions of cushion material

选发泡聚乙烯材料的厚度为 0.01 m ,发泡聚苯乙烯的厚度为 0.028 m ,面积为 $7\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 。质量为 6 kg 的重锤从高度为 0.6 m 处自由落下,分别求出包装系统最大加速度-时间曲线的试验值与计算值,见图5。

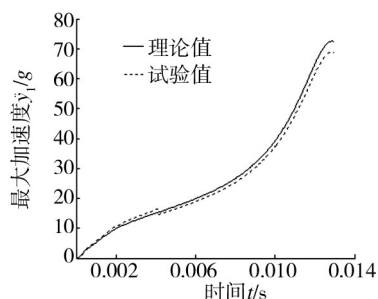


图5 加速度-时间曲线理论值与试验值对比

Fig.5 Comparison between calculated and experimental data of acceleration-time curve

如图5所示,加速度最大计算值为 72.51 g ,加速度最大试验值为 69.61 g ,两者相对误差为 4.17% 。

5 结语

运用Newton-Raphson方法,计算了串联包装结构动力学响应,并建立了串联结构优化设计模型。算例介绍了串联结构的优化计算过程,加速度-时间曲线的试验值与计算值相吻合。文中所提出的方法可有效地指导包装结构设计。

参考文献:

- [1] WANG Zhi-wei. On Evaluation of Product Dropping Damage [J]. Packaging Technology and Science, 2002, 15 (3): 115—120.
- [2] 卢富德,陶伟明,高德. 具有简支梁式易损部件的产品包装系统跌落冲击研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(15): 79—81.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Drop Impact Analysis on Item Packaging System with Beam Type Elastic Critical Component[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31 (15): 79—81.
- [3] 高德,卢富德. 考虑转动的双曲正切与正切组合模型缓冲系统冲击响应研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(1): 6—11.
GAO De, LU Fu-de. The Shock Response Of Hyperbolic Tangent and Tangent Comprehensive Model on Cushion System Considering Rotary Motion[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(1): 6—11.
- [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,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. Cushion Model and Its Application of C-flute Corrugated Paperboard[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(1): 39—41.
- [6] 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

(下转第26页)

- (4):23—25.
- [9] WANG Y Y, LU C J, LI X M. Simulation of Drop Impact Reliability for Electronic Devices[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 41:667—680.
- [10] JONGKOO H, JONG M P. Finite Element Analysis of Vent/Hand Hole Designs for Corrugated Fiberboard Boxes[J]. Packaging Technology and Science, 2007, 20:39—47.
- [11] 王鹤腾,高德,常江. 基于非线性有限元的瓦楞纸板静态压缩性能仿真研究[J]. 包装工程, 2006, 27(5):1—3.
- WANG He-teng, GAO De, CHANG Jiang. The Simulation Research of Corrugated Board about the Static Compression Performance Based on the Nonlinear Finite Element[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5):1—3.
- [12] BELDIE L, SANDBERG G, SANDBERG L. Paperboard Packages Exposed to Static Loads—finite Element Modeling and Experiments[J]. Packaging Technology and Science, 2001, 14(4):171—178.
- [13] 刘义翔,高德,刘晔. 基于ADAMS软件瓦楞纸板缓冲性能的动力学仿真研究[J]. 包装工程, 2002, 23(4):127—129.
- LIU Yi-xiang, GAO De, LIU Ye. Dynamic Simulation Research of Corrugated Board Cushioning Performance Based on ADAMS Software[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(4):127—129.
- [14] LOW K H, WANG Y Q, HOON K H, et al. Initial Global-local Analysis for Drop-impact Effect Study of TV Products[J]. Advances in Engineering Software, 2004, 35:179—190.
- [15] JEONG W Y, GYUNG J P. Development of a Design System for EPS Cushioning Package of a Monitor Using Axiomatic Design[J]. Advances in Engineering Software, 2005 (36):273—284.

(上接第21页)

- Paperboard Box[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(3):335—341.
- [7] 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.
- [8] 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(15):1—5.
- [9] GAO De, LU Fu-de, CHEN S J. Drop Impact Analysis of Cushioning System with an Elastic Critical Component of Cantilever Beam Type[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(37):1—5.
- [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] 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.
- [12] 卢富德,张绍云,杜启祥. 发泡聚乙烯隔振性能研究[J]. 包装工程, 2011, 32(11):1—4.
- LU Fu-de, ZHANG Shao-yun, DU Qi-xiang. Study of Vibration Isolation Performance of EPE[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(11):1—4.
- [13] ROUILLARD V, MICHAEL S E K. Creating Transport Vibration Simulation Profiles from Vehicle and Road Characteristics[J]. Packaging Technology and Science, 2013(26):82—95.
- [14] 沈黎明,张华良,顾祖莉. 运输包装件振动试验系统研究[J]. 中国测试技术, 2005, 31(6):87—89.
- SHEN Li-ming, ZAHNG Hua-liang, GU Zu-li. Research on the Vibration Test System of Transport Package[J]. China Measurement Technology, 2005, 31(6):87—89.