

叠置组合缓冲衬垫设计算例及数值仿真对比分析

滑广军^{1,2}, 黄益阳²

(1.湖南工业大学 包装与材料工程学院, 株洲 412007; 2.深圳市冠为科技股份有限公司, 深圳 518110)

摘要: **目的** 提出叠置组合缓冲衬垫的设计思路, 并对该方法的正确性进行数值仿真验证。**方法** 基于数学思想对叠置组合缓冲衬垫设计方法进行分析, 设计线弹性材料模型算例, 并获得解析解, 最后基于 Ansys 软件的 DTM 模块进行数值仿真验证。**结果** 数值仿真结果与解析解的误差为 2.1%, 验证了叠置组合缓冲设计方法的正确性。**结论** 从数学意义上理解, 叠置组合缓冲衬垫设计方法是不确定方程组求解问题, 需要通过施加更多的约束条件获得确定的设计结果。Ansys 软件的 DTM 模块可以用于缓冲包装系统的性能评价, 是一种简单高效的分析工具。

关键词: 组合缓冲衬垫; 叠置组合; 数值仿真; 缓冲系数; 运输包装

中图分类号: TB485.1; TB302.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)11-0077-04

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.11.014

Comparative Analysis on Design Example and Numerical Simulation of Overlay Combination Cushion

HUA Guang-jun^{1,2}, HUANG Yi-yang²

(1.School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

2.Shenzhen Guanwei Technology Co., Ltd., Shenzhen 518110, China)

ABSTRACT: The work aims to propose the design idea of overlay combination cushion, and verify the correctness of the method by numerical simulation method. Based on mathematical ideas, the design method of overlay combination cushion was analyzed. An example of linear elastic material model was designed, and the analytical solution was obtained. Numerical simulation was verified based on DTM module of Ansys software. The error of the numerical simulation results and the analytical solution was 2.1%, which verified the correctness of the overlay combination cushion design method. In the mathematical sense, the design method of overlay combination cushion needs to obtain the determinate design result by applying more constraint conditions when the solutions to the equation set are indeterminate. The DTM module of Ansys software is a simple and efficient analysis tool to evaluate the performance of the cushioning packaging system.

KEY WORDS: combination cushion; overlay combination; numerical simulation; cushioning coefficient; transport packaging

缓冲包装的作用是减缓产品在流通过程中受到的冲击与震动^[1]。一个完整的缓冲包装系统一般包括产品、缓冲衬垫和外包装容器。缓冲衬垫一般选用一种材料, 便于生产、包装及使用后的分选处理。2 种以上的缓冲材料通过不同形式的组合替代单一缓冲

材料, 有利于发挥不同材料的优点, 获得更优的保护性能、经济性能及环保性能。近些年组合缓冲包装在重型家用电器产品(空调、冰箱、电视机等)得到了广泛的应用。组合缓冲包装时, 与产品接触的内层衬垫一般选用柔软的塑料类缓冲材料, 起保护产品表面

收稿日期: 2018-02-10

基金项目: 湖南省教改基金(湘教通[2015]291-308); 湖南省科技计划基金(2015JC3114); 中国包装联合会“绿色包装与安全”专项基金(2016ZBLZ01, 2017ZBLY09)

作者简介: 滑广军(1975—), 男, 博士, 湖南工业大学副教授, 主要研究方向为运输包装技术、振动测试与故障诊断、结构动力学、CAD/CAE。

及缓冲作用;外层与包装容器接触的部位一般选用较硬的纸质缓冲材料,起固定产品、承载及辅助缓冲作用。对于单一材料的缓冲包装设计,包装学科已经形成了一套比较完整的设计、试验及理论体系,在包装专业教学及缓冲包装设计领域得到了广泛的应用。对于2种以上材料的组合缓冲包装设计,包装行业专家也进行了一系列研究。佟富强等^[2-3]基于经典力学理论研究了线弹性材料的并列组合及叠置组合性能。朱若燕等^[4-6]对缓冲材料组合性能进行了实验分析。田芑^[7]研究了纸塑组合缓冲包装设计方法。向红^[8]以经典力学体系为基础,结合产品特性、缓冲材料特性及流通环境特性对缓冲包装的要求,论述了缓冲包装设计的理论及知识体系,该理论体系利用材料的缓冲系数-最大应力曲线或最大加速度-静应力曲线进行缓冲包装设计。滑广军等^[9-11]揭示了经典缓冲包装设计方法的数学内涵,并基于缓冲包装设计理论体系进行了推导,得到了简洁的并置组合及叠置组合材料的等效缓冲系数公式,但并没有进一步的应用及验证。文中以线弹性材料为例,提出了叠置组合缓冲包装设计思路及设计步骤,基于经典缓冲包装理论获得了缓冲设计的解析解,并利用数值仿真分析方法进行了验证。

1 经典缓冲包装设计方法的数学内涵

1.1 基于缓冲系数-最大应力曲线的缓冲设计方法

该设计方法是经典的缓冲包装设计方法,考虑了产品的特性、缓冲材料的特性及流通环境的特性。利用 $C-\sigma_m$ 曲线表征材料缓冲性能,用许用脆值 G 表征产品强度,用跌落高度 H 表征流通环境的冲击强度,进行缓冲衬垫面积、厚度及结构设计。

文献[9]基于数学思想,将基于 $C-\sigma_m$ 曲线的缓冲设计方法归纳为求解不确定方程组的问题:

$$C = f(\sigma_m) \quad (1)$$

$$A = \frac{GW}{\sigma_m} \quad (2)$$

$$h = \frac{CH}{G} \quad (3)$$

式中: C 为材料缓冲系数; σ_m 为最大应力; A 为缓冲垫面积; W 为产品重量; G 为产品脆值; h 为缓冲垫厚度; H 为跌落高度。式(1)采用通用函数的形式表示缓冲系数与最大应力曲线的关系,如果缓冲系数-最大应力曲线确定,则该函数的自变量与因变量的关系也是确定的。

将式(1—3)联立组成方程组。由于参数 G, W, H 通常在缓冲设计前可以通过实验的方法获得,因此该方程组中还有4个不确定的参数: h, A, C, σ_m ,未知参数的个数大于方程的个数,因此,一般情况下,该

方程组是没有确定的解。在数学上,方程组的解一般是一个集合。对于工程应用,最终需要有确定的解。对于式(1—3)所构成的方程组,如要获得确定的解,需要增加更多的约束条件。

1.2 基于最大加速度-静应力曲线的缓冲设计方法

在1.1节中对基于缓冲系数-最大应力曲线的缓冲设计方法的数学解释同样可以用于理解基于最大加速度-静应力曲线的缓冲包装设计方法,两者不同的是,后者的最大加速度-静应力曲线中还有参变量 h ,因此最大加速度-静应力曲线映射的是最大加速度与静应力 σ_{st} 及衬垫厚度 h 的关系,见式(4)。衬垫面积 A 与产品重量 W 及静应力 σ_{st} 的关系见式(5)。

$$G = f(\sigma_{st}, h) \quad (4)$$

$$A = \frac{W}{\sigma_{st}} \quad (5)$$

式中: σ_{st} 为静应力。式(4)利用通用函数的形式表征缓冲材料的最大加速度-静应力曲线的关系。式(4)与式(5)联立组成方程组,由于参数 G, W 通常在缓冲设计前一般已经获得,因此该方程组中有3个不确定的参数: h, A, σ_{st} ,未知参数的个数大于方程的个数,因此,该方程组同样没有确定解。如要获得确定的解,需要增加更多的约束条件。

2 叠置组合缓冲衬垫设计方法的数学内涵

2种材料叠置组合缓冲系数见式(6)^[10]。

$$C = \frac{C_1 C_2}{\beta C_1 + \alpha C_2} \quad (6)$$

式中: $\alpha = h_1/h, \beta = h_2/h, \alpha + \beta = 1$; C 为等效缓冲系数; h_1, h_2 为衬垫1及衬垫2的厚度; h 为叠置组合衬垫的总厚度; C_1, C_2 为衬垫1及衬垫2的缓冲系数; α, β 分别为2种材料厚度与总厚度的比例。将式(6)中的 α, β 参数用衬垫厚度参数 h, h_1, h_2 代替,见式(7)。叠置组合衬垫的总厚度为衬垫1与衬垫2的厚度和,见式(8)。衬垫1与衬垫2的缓冲系数-最大应力曲线的等效通用函数分别见式(9—10)。

$$C = \frac{h C_1 C_2}{h_2 C_1 + h_1 C_2} \quad (7)$$

$$h = h_1 + h_2 \quad (8)$$

$$C_1 = f_1(\sigma_m) \quad (9)$$

$$C_2 = f_2(\sigma_m) \quad (10)$$

对于叠置组合缓冲包装,需要确定的参数更多,其设计过程比一种材料的缓冲衬垫要复杂。对于叠置组合缓冲包装,在冲击载荷的作用下,衬垫1与衬垫2的应力、面积是相等的。式(2—3)与式(7—10)构成的方程组中,有 $h, h_1, h_2, A, \sigma_m, C_1, C_2, C$ 等8个参数需要确定,因此同样需要加入更多的约束条件。

3 叠置组合缓冲衬垫设计算例

对于不确定方程组, 已知条件及约束条件不同, 方程组求解的方法也有所不同。在工程应用中, 缓冲包装使用的材料特性、产品的特性、环境的特性往往都不能准确确定(实验手段的局限性及实验误差等)。为了验证叠置组合缓冲衬垫设计方法的准确性, 文中构建了理想的线弹性材料叠置组合缓冲衬垫设计算例。

某产品脆值为 60g (脆值为标量, 取重力加速度的倍数), 其长宽高均为 0.2 m。产品材料及叠置组合缓冲材料均为线弹性材料。产品材料弹性模量为 20 GPa, 密度为 2000 kg/m³, 泊松比为 0.3; 跌落高度为 0.6 m (包装件底面与地面之间的距离); 衬垫 1 材料弹性模量为 0.6 MPa, 密度为 20 kg/m³, 泊松比为 0.3; 衬垫 2 材料弹性模量为 2 MPa, 密度为 20 kg/m³, 泊松比为 0.3。

式(2—3)与式(7—10)等 6 个方程构成的方程组中有 8 个参数需要确定, 因此需要加入更多的约束条件, 若采用全面缓冲方案, 则衬垫面积为 $A=0.04 \text{ m}^2$ 。衬垫 1 材料较柔软, 位于内侧, 与商品接触; 衬垫 2 位于外侧, 与包装容器接触, 若衬垫 2 厚度为 0.01 m。然后利用式(2—3)与式(7—10)组确定叠置组合缓冲衬垫的其他参数。

将 $A=0.04$ 带入式(2)可得, $\sigma_m=0.2352 \text{ MPa}$ 。对于线弹性材料, 缓冲系数见式(11) [11]。

$$C = \frac{2E}{\sigma_m} \quad (11)$$

将 $\sigma_m=0.2352 \text{ MPa}$ 、衬垫 1 材料及衬垫 2 材料的弹性模量分别代入式(11)可得 $C_1=4.25$, $C_2=17.0$ 。

将 $C_1=4.25$, $C_2=17.0$, $h_2=0.01$ 分别带入式(7—8), 并与式(3)联立可求得叠置组合衬垫的总厚度 $h=0.05 \text{ m}$, 衬垫 1 厚度 $h_1=0.04 \text{ m}$ 。

由衬垫 1 与衬垫 2 的厚度、面积、弹性模量, 可计算叠置组合衬垫的等效弹簧刚度 $k=470 \text{ kN/m}$ [12]。产品质量为 16 kg, 则利用式(12)可计算产品与衬垫构成系统的固有圆频率为 171.4 rad/s, 利用式(13)可计算产品衬垫系统从高度 0.6 m 跌落的最大加速度为 60.82g, 该最大加速度是叠置组合缓冲衬垫-产品跌落冲击的理论解。该理论解考虑了衬垫压缩变形效应, 会使实际跌落高度大于设计跌落高度 H , 该理论解略大于产品脆值。

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (12)$$

$$\ddot{x}_{\max} = \omega \sqrt{2gH} \quad (13)$$

4 叠置组合缓冲衬垫数值仿真分析

利用 Ansys 软件的 DTM 模块可以高效完成跌落

仿真分析过程 [13—15]。文中基于 DTM 模块进行跌落仿真分析, 首先建立叠置衬垫与产品的几何模型, 见图 1, 最底部的为缓冲衬垫 2, 中间为缓冲衬垫 1, 2 个衬垫叠置组合。该例选用 solid164 单元, 2 种材料均选用各向同性的线弹性材料, 材料参数见文中 3 节, 单元大小为 0.01 m, 由于该例几何模型比较规则, 对产品与衬垫 1、衬垫 1 与衬垫 2 同位置节点进行合并处理, 有限元模型见图 2。跌落目标面材料密度为 2000 kg/m³, 目标面弹性模量为 20 GPa, 泊松比为 0.3, 接触面的摩擦因数设为 0, 求解后可得重心的最大加速度为 62.1g, 重心最大加速度-时间历程曲线见图 3。图 3 中纵坐标加速度为叠置组合衬垫-产品系统垂直跌落时重心在 y 方向的加速度。数值仿真的最大加速度比理论值大 2.1%, 满足一般工程应用对计算精度的要求。另外, 数值仿真最大加速度略大于理论最大加速度, 因此基于数值仿真方法设计叠置组合缓冲衬垫更为安全。最大加速度的理论计算值略大于产品脆值, 这说明基于产品最低点与地面的距离作为跌落高度设计缓冲衬垫是偏不安全的, 实际设计时需要考虑衬垫变形对跌落高度的增加效应。

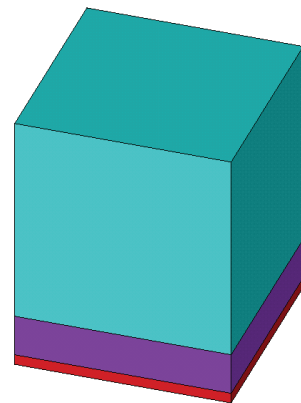


图 1 叠置组合缓冲衬垫与产品几何模型
Fig.1 Geometric model of overlay combination cushion and product

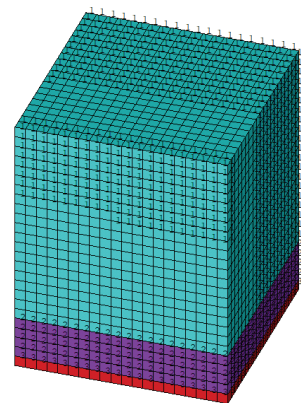


图 2 叠置组合缓冲衬垫与产品有限元模型
Fig.2 Finite element model of overlay combination cushion and product

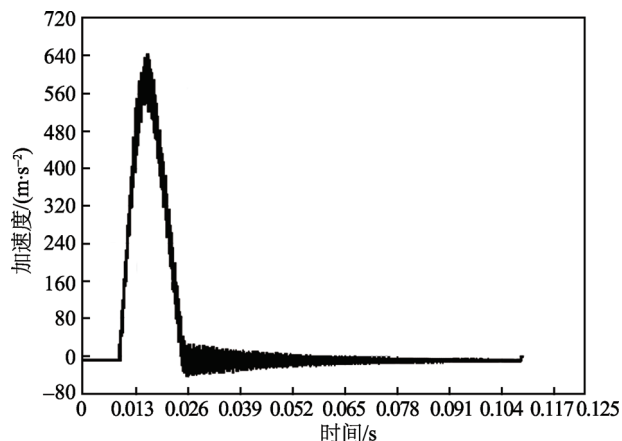


图3 产品重心加速度时间历程

Fig.3 Acceleration-time history of product centroid

5 结语

1) 叠置组合缓冲衬垫设计需要确定的参数比单一材料衬垫多,设计时需要施加更多的约束条件。

2) 叠置缓冲衬垫与产品系统跌落分析的数值仿真结果与解析解误差为 2.1%,满足一般工程应用对计算精度的要求,验证了叠置缓冲衬垫设计方法的准确性。

3) 最大加速度的理论计算值略大于产品脆值,这说明基于产品最低点与地面的距离作为跌落高度设计缓冲衬垫是偏不安全的,实际设计时需要考虑衬垫变形对跌落高度的增加效应。

4) 数值仿真计算的最大加速度略大于理论最大加速度,因此基于数值仿真方法设计叠置组合缓冲衬垫是偏保守的。

参考文献:

- [1] GB-T 8166—2011, 缓冲包装设计方法[S].
GB-T 8166—2011, Package Cushioning Design Method[S].
- [2] 佟富强, 张伟, 刘宝璋. 两种线弹性材料组合的缓冲包装设计[J]. 吉林大学学报(科学版), 1994(1): 76—78.
TONG Fu-qiang, ZHANG Wei, LIU Bao-zhang. Cushioning Packaging Design of Two Kinds of Linear Elastic Material[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 1994(1): 76—78.
- [3] 佟富强, 张伟, 刘宝璋. 两种缓冲材料并列组合的包装设计[J]. 包装工程, 1993, 14(2): 86—88.
TONG Fu-qiang, ZHANG Wei, LIU Bao-zhang. Packaging Design for the Multiple Combination of Two kinds of Cushioning Materials[J]. Packaging Engineering, 1993(2): 86—88.
- [4] 朱若燕, 尹琪, 李厚民. 组合蜂窝纸板缓冲性能的静态试验研究[J]. 湖北工业大学学报, 2010, 25(4): 105—107.
ZHU Ruo-yan, YIN Qi, LI Hou-min. Study of the Performance of Combinatorial Honeycomb Paperboards Through the Static Compression[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2010, 25(4): 105—107.
- [5] 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.
- [6] 徐长妍, 张云. 组合瓦楞纸板缓冲衬垫的力学性能研究[J]. 中国包装, 2010, 30(3): 71—74.
XU Chang-yan, ZHANG Yun. Study on Mechanical Properties of Combined Corrugated Board Cushioning Pad[J]. China Packaging, 2010, 30(3): 71—74.
- [7] 田芑. 纸塑组合缓冲结构性能及设计方法研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2014.
TIAN Peng. Research on Design Method and Cushioning Property of Paper and Plastic Combination Structure[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2014.
- [8] 向红. 包装工程设计基础[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
XIANG Hong. Fundamentals of Packaging Design Engineering[M]. Changsha: National Defence Industry Press, 2002.
- [9] WEI Zhuan, HUA Guang-jun. Research on Cushioning Package Design Methods Based on Infinitive Equations[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 200: 109—113.
- [10] 滑广军, 谢勇, 李凤玲. 组合缓冲包装衬垫的缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2016, 37(17): 108—111.
HUA Guang-jun, XIE Yong, LI Feng-ling. Cushioning Property of Combination Packaging Cushion[J]. 2016, 37(17): 108—111.
- [11] 滑广军, 刘跃军, 谢勇. ANSYS 包装工程应用实例解析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.
HUA Guang-jun, LIU Yue-jun, XIE Yong. Application Example of Packaging Engineering Based on ANSYS Software[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University press, 2017.
- [12] 彭国训. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012.
PENG Guo-xun. Packaging Design of Logistics Transportation[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012.
- [13] 尚晓红, 苏建宇, 王化锋. ANSYS/LS-DYNA 动力学分析方法与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
SHANG Xiao-hong, SU Jian-yu, WANG Hua-feng. ANSYS/LS-DYNA Dynamic Analysis Method and Engineering Example[M]. Beijing: China Water and Hydropower Press, 2008.
- [14] HUA G J, SHEN Y, ZHAO D, et al. Experimental and Numerical Analysis of the Edge Effect for Corrugated and Honeycomb Fiberboard[J]. Strength of Materials, 2017, 49(1): 188—197.
- [15] HUA Guang-jun, XIE Yong. Combination Cushioning Pad Design and Drop Simulation[C]// 19th IAPRI World Conference on Packaging 2014: Responsible Packaging for a Global Market, 2014: 167—171.