

包装技术与工艺

组合缓冲包装衬垫的缓冲性能研究

滑广军¹, 谢勇¹, 李凤玲²

(1.湖南工业大学, 株洲 412008; 2.长沙理工大学, 长沙 410076)

摘要: **目的** 为促进缓冲材料的组合应用, 对材料不同组合形式的等效缓冲性能进行研究。**方法** 利用缓冲包装设计的理论和知识体系进行公式推导。**结果** 叠置及并置组合后, 等效缓冲系数取值区域介于 2 种组合材料缓冲系数之间; 组合等效缓冲系数公式以不同材料的缓冲性能参数及比例参数表达。**结论** 推导过程没有对材料模型进行假设, 该组合等效缓冲系数公式具有较强的普适性。该等效缓冲系数公式的提出为组合缓冲衬垫设计及不同种类缓冲材料的合理使用提供了依据。

关键词: 组合缓冲衬垫; 叠置组合; 并置组合; 缓冲系数; 运输包装

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)17-0108-04

Cushioning Property of Combination Packaging Cushion

HUA Guang-jun¹, XIE Yong¹, LI Feng-ling²

(1.Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China;

2.Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China)

ABSTRACT: The equivalent cushioning property of different combination forms is studied in order to promote the application of combination cushion. Theoretical derivation was carried out based on the theory and knowledge system of cushioning packaging design. The equivalent combination coefficient value was between the coefficients of the two combination materials. The equivalent cushioning coefficient formula was expressed by cushioning property parameters of the two combination materials. In conclusion, hypothesis has not been made in the derivation process. The combination equivalent cushioning coefficient formula has strong universality. It provides a basis for the design of combination cushion and the reasonable use of different cushion materials.

KEY WORDS: combination cushion; overlay combination; parallel combination; cushioning coefficient; transport packaging

目前, 运输包装缓冲衬垫材料选用既有蜂窝纸板、瓦楞纸板等可自然降解、可回收利用的绿色、生态型材料, 又有传统的 EPE、EPS 等塑料类缓冲材料。业内一些专家对这些材料的缓冲机理及缓冲性能进行了理论研究^[1-7], 一些专家利用实验手段进行分析^[8]。如何结合 2 类缓冲材料的优点进行缓

冲结构的设计, 实现经济包装、绿色包装, 是业内比较关心的问题。

近些年组合包装技术发展迅速, 组合缓冲衬垫在包装行业的应用越来越广泛。组合缓冲衬垫与产品接触的内层一般用较软的缓冲材料, 起保护产品表面及缓冲作用; 外层一般用较硬的材料, 起固定

收稿日期: 2016-01-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51408069); 湖南省科技计划 (2015JC3114); 湖南省教改项目 (湘教通[2015]291-308)

作者简介: 滑广军 (1975—), 男, 河南长垣人, 工学博士, 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。

产品及辅助缓冲作用。目前业内对组合缓冲包装的研究主要集中在实验分析, 对组合缓冲包装设计方法的理论研究工作还不充分^[9-10]。文献[11]对组合蜂窝纸板的缓冲性能进行了研究。文献[12]对纸塑组合缓冲包装设计方法进行了实验及仿真分析。文献[13]、[14]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。这些研究工作对组合缓冲包装的设计及应用有一定的积极意义和指导作用。

包装专业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, 提出了缓冲设计 5 步法, 建立了缓冲包装设计的理论及知识体系, 利用该理论体系进行缓冲结构设计时, 直接利用缓冲材料的缓冲系数-最大应力曲线或最大加速度-静应力曲线进行设计^[15-16]。文中基于缓冲包装设计理论及知识体系进行了推导, 得到了适用性更强的、形式更简单的并置组合和叠置组合衬垫的等效缓冲系数公式。

1 基于缓冲系数-最大应力的缓冲包装设计

基于缓冲系数-最大应力的缓冲包装设计方法利用材料的缓冲系数-最大应力曲线 ($C-\sigma_m$ 曲线) 表征材料的缓冲性能, 用许用脆值 $[G]$ 表征产品的易损性, 用跌落高度 H 表征流通环境的冲击强度, 通过恰当的缓冲衬垫面积、厚度及结构设计, 使传递到产品上的最大加速度小于产品的脆值, 从而确保产品承受一定的冲击载荷而不破损。

材料的缓冲系数一般表达为:

$$C = \frac{\sigma}{e} \quad (1)$$

式中: σ 为最大应力; e 为达到最大应力 σ 时材料的单位变形能, $e = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon$ 。

2 组合衬垫的缓冲系数

2.1 叠置组合衬垫的等效缓冲系数

叠置组合缓冲包装目前应用较多。对于叠置组合缓冲, 若衬垫 1 与衬垫 2 衬垫面积相等, 厚度分别为 h_1 , h_2 。在载荷 P 的作用下, 衬垫 1 与衬垫 2 的应力相等。图 1 为缓冲材料 1 及缓冲材料 2 的缓冲系数-最大应力曲线, 叠置组合的衬垫 1 使用缓冲材料 1, 衬垫 2 使用缓冲材料 2。按照式(1), 缓

冲系数等于缓冲材料承受的最大应力与材料单位体积变形能的比值, 因此, 叠置组合衬垫的等效缓冲系数, 需先求出组合材料的等效单位体积变形能及其对应的最大应力。

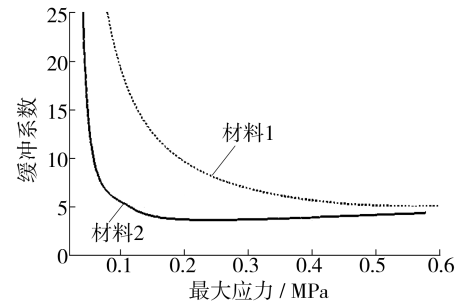


图 1 材料缓冲系数-最大应力曲线

Fig.1 $C-\sigma_m$ curves

设衬垫 1 与衬垫 2 单位体积变形能分别为 e_1 , e_2 , 则叠置组合衬垫等效单位体积变形能为:

$$e = \frac{Ah_1e_1 + Ah_2e_2}{A(h_1 + h_2)} = \frac{h_1e_1 + h_2e_2}{h} \quad (2)$$

设 $\alpha = h_1/h$, $\beta = h_2/h$, $\alpha + \beta = 1$ 代入式(2)得:

$$e = \alpha e_1 + \beta e_2 \quad (3)$$

将式(3)代入式(1):

$$C = \frac{\sigma}{\alpha e_1 + \beta e_2} \quad (4)$$

衬垫 1 与衬垫 2 的缓冲系数分别为:

$$C_1 = \frac{\sigma_1}{e_1} = \frac{\sigma}{e_1} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{\sigma_2}{e_2} = \frac{\sigma}{e_2} \quad (6)$$

将式(5)及式(6)代入式(4)可得:

$$C_e = \frac{C_1 C_2}{\beta C_1 + \alpha C_2} \quad (7)$$

在式(7)的推导过程中, 没有对材料的线性、非线性等特征进行任何假设, 完全是在经典缓冲包装设计理论及知识体系下进行的推导, 不需要再引入新的材料参数, 因此, 式(7)即适用于文献[17]确定的各种缓冲材料的叠置组合衬垫缓冲性能表征。该等效缓冲系数仅由叠置组合材料的缓冲性能参数及 2 种材料的比例参数确定。

2.2 并置组合材料的缓冲系数

不同缓冲材料并置组合的形式在实际应用中并没有叠置组合普及。对于并置组合缓冲形式, 若两衬垫厚度相等, 面积分别为 A_1 , A_2 , 在载荷 P 的作

用下,若衬垫 1 及衬垫 2 的应变相等。假设衬垫 1 与衬垫 2 的单位体积变形能分别为 e_1 , e_2 , 则并置组合材料的等效单位体积变形能为:

$$e = \frac{A_1 h e_1 + A_2 h e_2}{(A_1 + A_2)h} = \frac{A_1 e_1 + A_2 e_2}{A} \quad (8)$$

设 $\alpha = A_1/A$, $\beta = A_2/A$, $\alpha + \beta = 1$, 代入上式得:

$$e = \alpha e_1 + \beta e_2 \quad (9)$$

将式(9)带入式(1):

$$C = \frac{\sigma}{\alpha e_1 + \beta e_2} \quad (10)$$

并置衬垫的等效应力为:

$$\sigma = \alpha \sigma_1 + \beta \sigma_2 \quad (11)$$

式中:

$$e_1 = \frac{\sigma_1}{C_1} \quad (12)$$

$$e_2 = \frac{\sigma_2}{C_2} \quad (13)$$

将式(11), 式(12)及式(13)代入式(10)简化得:

$$C_e = C_1 C_2 \frac{\alpha \sigma_1 + \beta \sigma_2}{C_2 \alpha \sigma_1 + C_1 \beta \sigma_2} \quad (14)$$

同样, 式(14)的推导过程没有对材料的线性、弹性、非线性等特征进行任何假设。该等效缓冲系数仅由并置组合材料的缓冲曲线特征参数及 2 种材料的比例参数确定, 因此, 该等效缓冲系数公式是在运输包装缓冲设计知识体系下, 对并置组合缓冲结构缓冲性能的描述。

3 等效缓冲系数的取值范围

对于叠置组合, 若 $C_1 < C_2$, 则

$$C_e = \frac{C_1 C_2}{\beta C_1 + \alpha C_2} \geq C_1 \frac{C_2}{\beta C_2 + \alpha C_2} \quad (15)$$

因为 $\alpha + \beta = 1$, 所以有 $C_e \geq C_1$ 。同理, 可以证明 $C_e \leq C_2$ 。这说明叠置组合材料的缓冲性能介于 2 种材料缓冲性能之间, 通过 2 种材料厚度比例的组合可以调整衬垫的缓冲性能。利用式(7), 在已知缓冲材料 1 和缓冲材料 2 的 $C-\sigma_m$ 曲线 (静态缓冲系数-最大应力曲线) 的情况下, 对于每一组 α , β 参数, 都有一条等效缓冲系数-最大应力曲线, 缓冲材料 1 与缓冲材料 2 的 $C-\sigma_m$ 曲线所围成的区域是叠置组合衬垫等效缓冲系数取值区域。

对于并置组合, 若 $C_1 < C_2$, 同样有 $C_1 \leq C_e \leq C_2$, 因此, 2 种材料并置组合后, 组合材料缓冲性能

能也介于 2 种材料之间, 通过不同面积的组合可以调整衬垫的缓冲性能。

4 结语

叠置和并置组合后, 组合材料的等效缓冲系数介于组合的 2 种材料缓冲系数之间, 由 2 种材料的缓冲性能和 2 种材料组合比例确定。无论采取何种组合方式, 也不管 2 种组合材料的比例如何分配, 都不能获得缓冲性能更好的组合材料, 因此, 应该从发挥不同种类缓冲材料的综合性能的角度出发进行组合。

组合缓冲衬垫等效缓冲系数公式是在缓冲包装设计理论及知识体系下推导的, 没有引入其它物理参数, 不需要重新对组合材料性能进行测定。

获得的等效缓冲系数公式的推导没有进行材料线性、弹性、非线性的假设, 因此, 该组合等效缓冲系数公式适用广泛。

参考文献:

- [1] 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): 31—34.
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): 31—34.
- [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] 张华良, 刘乘. 包装材料缓冲特性曲线研究及其在缓冲设计中的应用[J]. 西北轻工业学院学报, 1990, 8(3): 45—48.
ZHANG Hua-liang, LIU Cheng. Study on Cushion Curves and Its Using in Cushion Design[J]. Journal of Northwest Institute on Light Industry, 1990, 8(3): 45—48.
- [4] WANG Zhi-wei, E Yu-ping. Mathematical Modeling of Energy Absorption Property for Paper Honeycomb in Various Ambient Humidities[J]. Materials and Design, 2010, 31(9): 4321—4328.
- [5] 高德, 卢富德. 具有转动包装系统的正切非线性模型冲击响应研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 131—136.
GAO De, LU Fu-de. Shock Response of A Nonlinear Tangent Packaging System with Rotation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 131—136.

- [6] 王军, 卢立新, 王志伟. 双曲正切包装系统关键部件三维冲击谱研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 99—101.
WANG Jun, LU Li-xin, WANG Zhi-wei. Three Dimensional Shock Spectrum of A Hyperbolic Tangent on Linear Packaging System with Critical Component [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 99—101.
- [7] 李连进. 产品隔振缓冲包装结构的设计方法[C]// 中国农业机械学会 2006 年学术年会论文: 1459—1461.
LI Lian-jin. Method of Design of Product Packing Structure of Vibration Isolation and Buffering[C]// China Agricultural Machinery Association 2006 Annual Conference Paper: 1459—1461.
- [8] 王梅. 蜂窝纸板缓冲性能的研究及应用[J]. 包装工程, 2000, 21(4): 5—8
WANG Mei. The Research of The Honeycomb Fibre-board Cushioning Performance and The Application[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(4): 5—8.
- [9] 言利容, 谢勇. 蜂窝纸板/EPE 组合材料的动态缓冲性能[J]. 包装工程, 2010, 31(9): 13—16.
YAN Li-rong, XIE Yong. Dynamic Cushioning Properties of Combination of Honeycomb Paperboard and EPE[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(9): 13—16.
- [10] 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.
- [11] 郭彦峰, 张景绘, 许文才, 等. 蜂窝纸板及其衬垫缓冲特性研究[J]. 包装工程, 2002, 23(5): 110—112.
GUO Yan-feng, ZHANG Jing-hui, XU Wen-cai, et al. Research on the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard and Its Cushion[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(5): 110—112.
- [12] 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.
- [13] 佟富强, 张伟, 刘宝璋. 两种线弹性体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.
- [14] 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, 14(2): 86—88.
- [15] 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.
- [16] 滑广军, 赵德坚, 肖颖喆, 等. 缓冲包装设计方法数学内涵探析[J]. 包装工程, 2013, 34(23): 64—67.
HUA Guang-jun, ZHAO De-jian, XIAO Ying-zhe, et al. Discussion and Analysis on Mathematical Connotation of Cushioning Packaging Design Method[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 64—67.
- [17] GB—T 8166—1987, 缓冲包装设计方法[S].
GB—T 8166—1987, Package Cushioning Design Method[S].