

蜂窝纸板缓冲曲线特征分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2018.01.001

滑广军^{1,2} 陈琬¹
卢富德¹ 蒋海云¹

1. 湖南工业大学

包装与材料工程学院

湖南 株洲 412007

2. 东莞嘉颐实业有限公司

广东 东莞 523000

摘要:分析了典型缓冲材料与蜂窝纸板力学模型的应力-应变曲线及缓冲系数-最大应力曲线特征,并提出了利用缓冲系数-最大应力曲线设计蜂窝纸板缓冲衬垫的方法。研究表明:典型缓冲材料的应力-应变曲线呈现单调递增趋势;蜂窝纸板的应力-应变曲线特征比较复杂,分为线弹性阶段、屈曲变形阶段、密实化阶段;蜂窝纸板的缓冲系数-最大应力曲线不规则,线弹性阶段的缓冲系数较大,缓冲效率不高,在该阶段可以与其它缓冲材料组合使用,屈曲变形阶段的缓冲系数及应力均较小,缓冲效率较高,但需要跨越峰值应力,在该阶段衬垫设计按照线弹性阶段的峰值应力计算,密实化阶段的材料承受应力较大,不利于保护产品。预压后的蜂窝纸板损失了部分承载能力,其缓冲系数-最大应力曲线平滑,因而其衬垫可按照经典缓冲衬垫设计方法进行设计。

关键词:蜂窝纸板;缓冲系数;应力-应变;缓冲衬垫

中图分类号: TB485.1; TB302.3 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2018)01-0001-07

0 引言

作为阵列式的空间薄壁材料,蜂窝纸板具有承载能力强、质量轻、结构稳定、缓冲性能优良、可靠性高,以及可回收、自然降解的特点,是一种替代塑料泡沫的环保材料,因而被广泛应用于家用电器、家具、轻型机电产品及军用物资的运输与包装中^[1-2]。国内外学者对蜂窝纸板的特性进行了大量研究。C. Combescure、Chen Q. 等^[3-4]研究了蜂窝芯结构的面内应力-应变曲线特征,将蜂窝芯结构的面内应力-应变曲线划分为线弹性阶段、屈曲变形阶段、密实化阶段。Hua G. J. 等^[5]研究了边缘效应及尺度效应对蜂窝纸板与瓦楞纸板侧压强度的影响,研究表明,消除边缘效应后,在大尺度规格条件下,蜂窝纸板具有更好的侧压强度。王志伟等^[6]研究了多次

低强度冲击对蜂窝纸板性能的影响,研究表明,蜂窝纸板经多次低强度冲击后,虽有局部折叠,但仍能保护产品。徐烁等^[7]研究了湿度对蜂窝纸板性能的影响,研究表明,随着相对湿度的增大,蜂窝纸板的最佳能量吸收点向左下方偏移,其单位体积吸收能量的能力减弱。范志庚等^[8]研究了疲劳压缩条件下蜂窝纸板内共振条件的参数变化规律,研究表明,疲劳效应对蜂窝纸板内共振条件的影响较大。刘胜祥等^[9]分析了蜂窝纸板的性能,探讨其在空投包装领域的应用前景,研究表明,蜂窝纸板具有密度小、抗弯刚度大、平压强度高、侧压强度高、缓冲性能好的优点,是低碳可再生的绿色包装材料,可作为空投包装材料。王军等^[10]研究了蜂窝纸板面内平台应力的表征,研究表明,纸板厚度和面纸

收稿日期: 2017-10-22

基金项目: 湖南省科技计划基金资助项目(2015JC3114), 湖南省教改基金资助项目(湘教通[2015]291-308), 湖南工业大学“绿色包装与安全”专项基金资助项目(2017ZBLY09, 2016ZBLZ01)

作者简介: 滑广军(1975-), 男, 河南长垣人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事物流运输包装技术, CAD/CAE, 振动测试与故障诊断, 结构动力学方面的研究, E-mail: 846620681@qq.com

性能对蜂窝纸板面内平台应力有较大影响,芯层性能对其影响较小。肖博等^[11]研究了动态冲击下芯子缺失蜂窝纸板的力学行为,研究结果表明,与规则的蜂窝纸板相比,随着芯子缺失率的增加,蜂窝纸板动态冲击压缩时的初始峰应力、平台应力及能量吸收能力均有下降。刘冰、张绍云等^[12-13]研究了蜂窝纸板与其它缓冲材料组合的性能。笔者^[14]对不同缓冲材料的组合缓冲设计方法进行了研究。上述研究对于正确认识及合理应用蜂窝纸板具有重要的指导意义。

物资空投往往在极端环境下进行,因此对物资的空投安全性及包装材料的可靠性有较高的要求^[15]。目前缓冲包装设计标准和规范主要是基于发泡塑料类缓冲材料制定。若直接利用经典缓冲包装设计方法设计蜂窝纸板缓冲衬垫,则误差较大。因此,本文对蜂窝纸板的力学特性曲线进行了研究,根据其缓冲系数-最大应力曲线,提出了基于经典缓冲包装设计理论的蜂窝纸板缓冲衬垫设计方法,以期为缓冲材料设计提供理论参考。

1 经典缓冲包装设计方法

基于缓冲系数-最大应力的缓冲包装设计方法是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^[16-17],并通过设计缓冲衬垫的面积、厚度及结构,使传递到产品的最大加速度小于产品的脆值,从而确保产品能承受一定的冲击载荷而不破损。

材料的缓冲系数反映了缓冲系数与最大应力的关系,可作为通用函数,即

$$C = f(\sigma_m) = \frac{\sigma_m}{e}, \quad (1)$$

式中: σ_m 为最大应力;

e 为达到最大应力 σ_m 时材料的单位体积变形能,即 $e = \int_0^e \sigma d\varepsilon$,其中 ε 为应变。

缓冲衬垫的面积 A 及厚度 h 的计算式见式(2)~(3)。

$$A = \frac{W[G]}{\sigma_m}, \quad (2)$$

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

式(2)~(3)中: W 为产品质量;

$[G]$ 为许用脆值,表征产品的易损性;

H 为跌落高度,表征流通环境的冲击强度。

将式(1)~(3)组成不确定方程组,从而将缓冲衬垫的设计问题(计算面积及厚度)转换为不确定方程组的求解问题^[18]。可见,基于缓冲系数-最大应力的缓冲包装设计方法的关键是如何利用材料的缓冲系数-最大应力曲线,得到缓冲衬垫合理的面积与厚度。

2 典型的缓冲材料力学模型

2.1 力-变形曲线模型

2.1.1 线弹性材料

线弹性材料是一种理想的材料,其力-变形曲线呈直线。虽然完全的线弹性材料并不存在,但是许多材料承载的初始阶段可以近似为线弹性材料。线弹性材料模型是研究其它材料模型的基础,即

$$F = kx. \quad (4)$$

式中: F 为作用在材料上的力;

k 为材料的弹性系数;

x 为 F 作用下材料的形变。

2.1.2 正切函数型缓冲材料

正切函数型缓冲材料是具有正切函数型的缓冲材料,如泡沫橡胶、棉花、乳胶海绵、碎纸、涂胶纤维及预压后的聚苯乙烯泡沫塑料等。其函数表达式为

$$F = \frac{2k_0 d_b}{\pi} \tan \frac{\pi x}{2d_b}, \quad (5)$$

式中: k_0 为初始弹性系数,即当 $x \rightarrow 0$ 时曲线的斜率;

d_b 为材料的形变极限,即当 $x \rightarrow d_b$ 时, $F \rightarrow \infty$ 。

2.1.3 双曲正切型缓冲材料

对于双曲正切型缓冲材料,在形变 x 允许的范围内,不论 x 怎么增大, F 始终被限制在规定范围内。因此,该缓冲材料能够将传递到产品上的冲击力控制在一定范围,以达到保护产品的目的。其函数表达为

$$F = F_0 \tan \frac{k_0 x}{F_0}. \quad (6)$$

式中 F_0 为材料的极限载荷,即当 $x \rightarrow x_0$ 时, $F \rightarrow F_0$ 。

2.1.4 三次函数型缓冲材料

一般将吊装弹簧的力-变形特性近似为三次函数,即

$$F = k_0 x + \gamma x^3, \quad (7)$$

式中 γ 为弹性系数增加率。

2.1.5 不规则型缓冲材料

以上4种模型只是对一些比较典型的缓冲材料特性的近似, 而大部分缓冲材料的力-变形曲线很难用一个函数进行表达, 将这类材料称为不规则型缓冲材料。大部分高分子发泡材料、瓦楞纸板、蜂窝纸板等都属于不规则型缓冲材料^[19-20]。

2.2 应力-应变模型

根据材料的力-变形曲线, 可以得到其相应的应力-应变模型($\sigma-\varepsilon$)。

1) 线弹性缓冲材料的应力-应变模型为

$$\sigma = E_0 \varepsilon \quad (8)$$

2) 正切型缓冲材料的应力-应变模型为

$$\sigma = \frac{2}{\pi} E_0 \tan\left(\frac{\pi}{2} \varepsilon\right) \quad (9)$$

3) 双曲正切型缓冲材料的应力-应变模型为

$$\sigma = \sigma_0 \tan\left(\frac{E_0 \varepsilon}{\sigma_0}\right) \quad (10)$$

4) 三次函数型缓冲材料的应力-应变模型为

$$\sigma = E_0 \varepsilon + \zeta \varepsilon^3 \quad (11)$$

式(8)~(11)中:

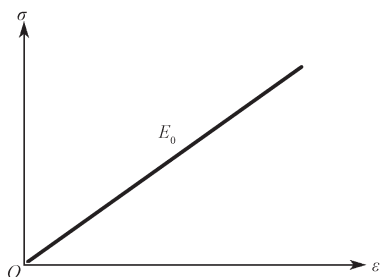
E_0 为材料的初始弹性模量;

σ_0 为材料极限应力;

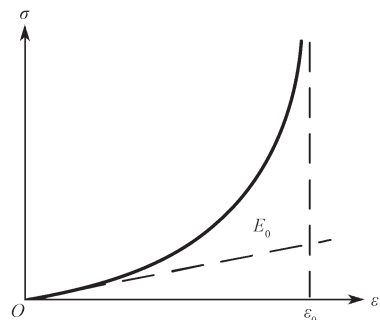
ζ 为弹性模量增加率。

5类典型缓冲材料的应力-应变曲线如图1所示。

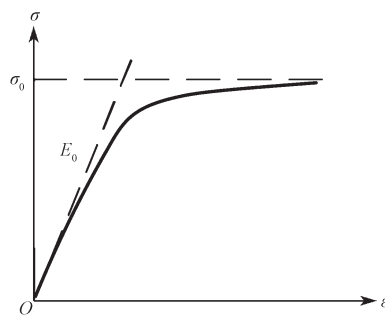
由图可知, 5类缓冲材料的应力与应变为单调递增关系。



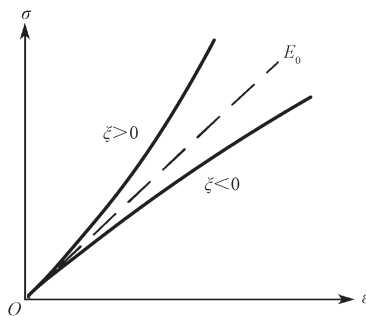
a) 线弹性缓冲材料



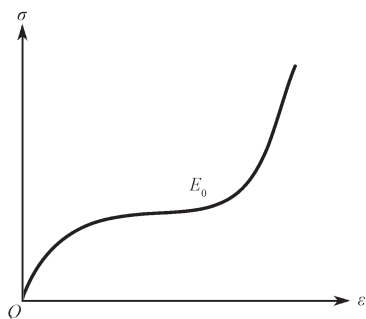
b) 正切型缓冲材料



c) 双曲正切型缓冲材料



d) 三次函数型缓冲材料



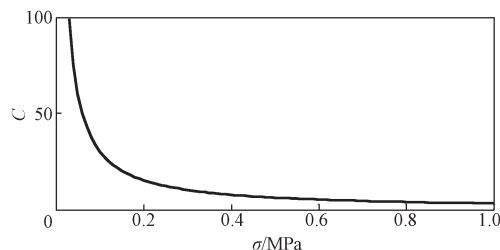
e) 不规则型缓冲材料

图1 典型的应力-应变模型

Fig. 1 Typical stress-strain model

2.3 缓冲系数-最大应力曲线

为了进一步分析材料的缓冲性能, 利用式(1)分别计算线弹性、正切型、双曲正切型缓冲材料的缓冲系数。设 $E_0=3$ MPa, $\sigma_0=1$ MPa, $\zeta=-1$, 则上述3种典型材料的缓冲系数-最大应力曲线如图2所示。由图可知, 3种典型的缓冲材料的缓冲系数随着应力的增加逐渐减小。



a) 线弹性缓冲材料

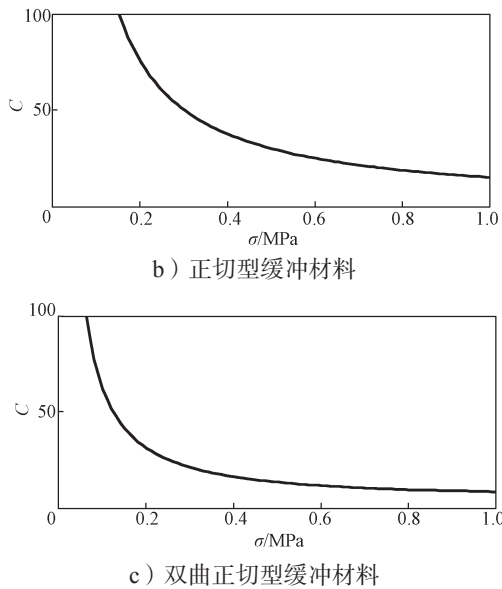


图2 典型材料的缓冲系数 - 最大应力曲线图
Fig. 2 Buffer coefficient of typical materials - maximum stress curve

3 蜂窝纸板的缓冲性能

3.1 应力 - 应变模型

蜂窝纸板由夹芯(由正六边形胞元构成)和上下面板组成,如图3a所示。蜂窝纸板的应力 - 应变曲线如图3b所示。

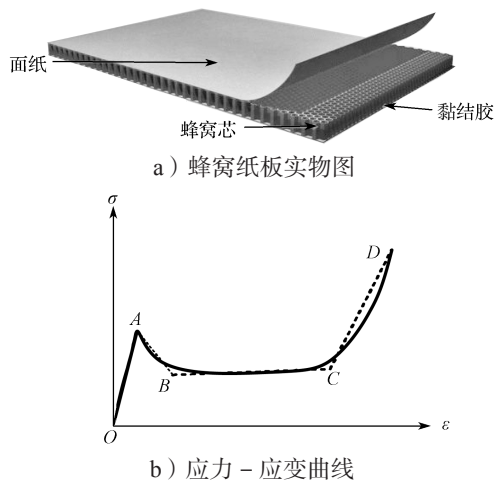


图3 蜂窝纸板实物与力学性能图
Fig. 3 Physical diagram and mechanical properties of honeycomb paperboard

由图3b可知:蜂窝纸板为不规则型缓冲材料;应力 - 应变曲线呈现先增后减,再缓慢增加,最后迅速增加的趋势。蜂窝纸板的应力 - 应变曲线分为

线弹性阶段、屈曲变形阶段、密实化阶段。 OA 段曲线为线弹性阶段,随着应力的迅速增加,应变增加,该阶段主要是由蜂窝芯纸的弹性变形引起,线弹性阶段区域较窄,虽然应力峰值比较大,但在变形过程中蜂窝纸板吸收的能量有限; AB 段曲线为初始屈曲变形阶段,承载能力迅速下降,而 BC 段曲线为稳定屈曲变形阶段,该阶段应力较小,变形区域较宽,吸收的总能量较大,其是蜂窝纸板的主要缓冲区域; CD 段曲线为密实化阶段,随着应力的增加,应变增加。为了方便分析,本文用分段线性函数进行近似,即利用线段 $OABCD$ 对不规则曲线进行近似。蜂窝纸板分段线性函数如下:

$$\begin{cases} \sigma=8.9\varepsilon, \varepsilon \leq 0.05; \\ \sigma=0.724-5.575\varepsilon, 0.05 < \varepsilon \leq 0.09; \\ \sigma=0.212+0.11\varepsilon, 0.09 < \varepsilon \leq 0.75; \\ \sigma=-2.751+4.06\varepsilon, 0.75 < \varepsilon \leq 0.85. \end{cases} \quad (12)$$

测试某蜂窝纸板的应力和应变,节点 O 、 A 、 B 、 C 、 D 对应的值如表1所示。

表1 蜂窝纸板应力 - 应变曲线节点值
Table 1 Joint stress and strain parameters of honeycomb paperboard

参数	O	A	B	C	D
应变	0	0.050	0.090	0.750	0.850
应力/MPa	0	0.445	0.222	0.294	0.700

3.2 缓冲系数 - 最大应力曲线

本文利用式(1)计算蜂窝纸板的缓冲系数,并绘制其缓冲系数 - 最大应力曲线,如图4所示。

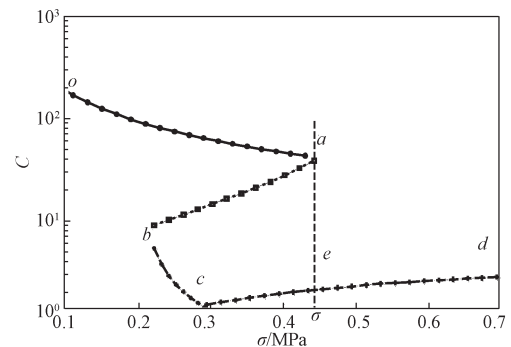


图4 蜂窝纸板的缓冲系数 - 最大应力曲线图
Fig. 4 Cushion coefficient - maximum stress curve of honeycomb paperboard

由图4可知:蜂窝纸板的缓冲系数与最大应力的关系比较复杂, oa 、 ab 、 bc 、 cd 分别与图3中 OA 、 AB 、 BC 、 CD 对应; oa 段曲线,蜂窝纸板的承载能

力较好, 缓冲系数随着应力的增加而减小; ab 段曲线, 蜂窝纸板的承载能力降低, 应变随着应力的增加而减小, 缓冲系数随着应力的减小而减小; bc 段曲线为蜂窝纸板屈曲变形阶段, 应变随着应力的增加而缓慢增加, 该区域跨度较大, 材料吸收能量较多, 该阶段缓冲系数随着应力的增加而减小; cd 段为蜂窝纸板密实化阶段, 缓冲系数随着应力的增加而增加。

对于缓冲材料, 如果承受的应力过小, 则材料使用效率不高; 如果承受的应力过大, 则产品易损坏。根据蜂窝纸板的缓冲系数-最大应力曲线可知: 处于 oa 段曲线时, 蜂窝纸板的承载能力好, 但缓冲系数较大, 缓冲效率不好, 因此蜂窝纸板可以与其它缓冲材料组合使用, 应用于空调等重型家电产品包装中; 处于 ab 、 bc 、 ce 段曲线时, 蜂窝纸板的缓冲系数较小, 应力也不大, 虽然吸收的能量增加, 但要经受较大的峰值应力 σ_a ; 处于 ed 段曲线时, 蜂窝纸板进入密实化阶段的后半区域, 材料承受的应力较大, 产品易损坏。

3.3 预压蜂窝纸板缓冲系数-最大应力曲线

为了充分利用蜂窝纸板的缓冲性能, 学者们提出将蜂窝纸板进行预压处理, 预压处理后蜂窝纸板损失了一定的承载能力。因此, 本文建立了预压处理后蜂窝纸板的分段函数, 即

$$\begin{cases} \sigma=8.9\varepsilon, & \varepsilon \leq 0.02; \\ \sigma=0.212+0.11\varepsilon, & 0.02 < \varepsilon \leq 0.75; \\ \sigma=-2.751+4.06\varepsilon, & 0.75 < \varepsilon \leq 0.85. \end{cases} \quad (13)$$

分段函数(13)对应的曲线如图5所示。由图可知, 与图3b相比, 经预压后, 蜂窝纸板的应力-应变曲线没有 AB 段, 线弹性阶段的峰值应力明显降低。

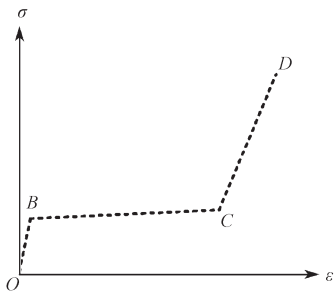


图5 预压蜂窝纸板的分段函数曲线图

Fig. 5 Segmentation function curve of preloaded honeycomb paperboard

利用式(1)得到分段函数(13)对应的缓冲系数。预压蜂窝纸板的缓冲系数-最大应力曲线如图6所示。

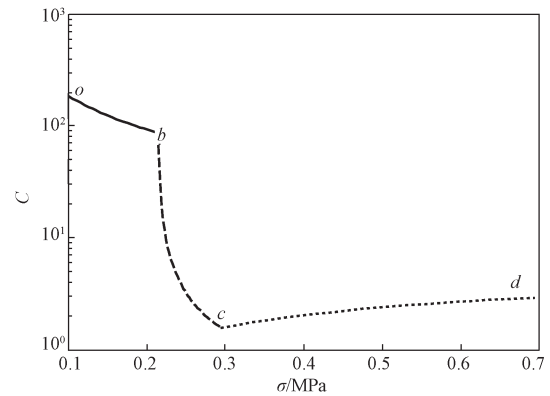


图6 预压蜂窝纸板的缓冲系数-最大应力曲线图

Fig. 6 Cushion coefficient-maximum stress curve of preloaded honeycomb paperboard

由图6可知, 与没有预压的蜂窝纸板的缓冲系数-最大应力曲线相比(见图4), 预压后蜂窝纸板的缓冲系数-最大应力曲线没有 ab 段曲线, oa 段被压缩, bc 段向上延伸。在缓冲系数较小区域使用预压蜂窝纸板时, 其不会经过大的应力阶段, 因此, 设计者们可以利用经典缓冲衬垫设计方法设计预压蜂窝纸板衬垫。

4 结论

由以上分析可知:

1) 传统缓冲材料的力-变形曲线及应力-应变曲线表现为单调递增的特性。蜂窝纸板的应力-应变曲线与传统缓冲材料不同, 分为线弹性阶段、屈曲变形阶段(初始、稳定屈曲阶段)、密实化阶段。线弹性阶段, 随着应力的增加, 应变增大; 达到屈曲临界载荷后, 随着应力的增加, 应变减小, 并进入较长的屈服平台区域, 此时, 随着应力的缓慢增加, 应变增大; 密实化阶段, 应变随着应力的增加而增大。

2) 蜂窝纸板作为缓冲材料在线弹性阶段的刚度较大, 该阶段适合作为承载区域, 缓冲效率不高。缓冲系数-最大应力曲线中 $abce$ 段, 蜂窝纸板的应力较小, 蜂窝纸板吸收的能量较多, 在该阶段使用材料会跨越应力峰值点 σ_a , 因此该阶段材料衬垫设计按最大应力 σ_a 计算; ed 段是密实化阶段的后半区域, 材料承受应力较大, 产品易损坏, 因此, 本文建议密实化阶段不使用蜂窝纸板包装产品。

3) 预压蜂窝纸板的缓冲系数-最大应力曲线没有 ab 段曲线, oa 段被压缩, bc 段向上延伸, 在缓冲

系数较小的区域使用缓冲材料不会经过大的应力阶段,因此,预压蜂窝纸板可以利用经典缓冲衬垫设计方法进行衬垫设计。

参考文献:

- [1] 王冬梅, 王志伟. 纸质结构型包装材料缓冲性能研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(6): 43-46.
WANG Dongmei, WANG Zhiwei. Research Advance in Paper Structure Cushioning Packaging Materials[J]. Materials Review, 2007, 21(6): 43-46.
- [2] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. 2ed ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 26-125.
- [3] COMBESURE C, HENRY P, ELLIOTT R S. Post-Bifurcation and Stability of a Finitely Strained Hexagonal Honeycomb Subjected to Equi-Biaxial In-Plane Loading[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016(88/89): 296-318.
- [4] CHEN Q, SHI Q, SIGNETTI S, et al. Plastic Collapse of Cylindrical Shell-Plate Assembled Periodic Honeycombs Under Uniaxial Compression: Experimental and Numerical Analyses[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016(111/112): 125-133.
- [5] 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.
- [6] 王志伟, 王立军, 徐晨翼. 多次低强度冲击对蜂窝纸板缓冲性能的影响[J]. 应用力学学报, 2015, 32(3): 441-445.
WANG Zhiwei, WANG Lijun, XU Chenyi. Effects of Low-Strength Repeated Impacts on Cushioning Performance of Honeycomb Paperboard[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(3): 441-445.
- [7] 徐 烁, 王志伟. 基于湿度影响的蜂窝纸板动态压缩能量吸收图[J]. 振动与冲击, 2012, 31(23): 203-206.
XU Shuo, WANG Zhiwei. Energy-Absorption Diagrams of Honeycomb Paperboards Under Dynamic Compression in Different Relative Humidities[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(23): 203-206.
- [8] 范志庚, 卢立新, 王 军. 疲劳效应对蜂窝纸板系统的内共振条件参数影响的研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(11): 203-207.
FAN Zhigeng, LU Lixin, WANG Jun. Effects of Fatigue Damage on Inner-Resonance Condition Parameters of a Honeycomb Paperboard System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(11): 203-207.
- [9] 刘胜祥, 王兴业, 徐丽丽, 等. 蜂窝纸板在空投包装中的应用[J]. 包装工程, 2016, 37(17): 25-29.
LIU Shengxiang, WANG Xingye, XU Lili, et al. Application of Honeycomb Paperboard in the Packaging of Airdrop[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(17): 25-29.
- [10] 王 军, 卢立新. 蜂窝纸板面内平台应力表征[J]. 工程力学, 2012, 29(8): 354-359, 365.
WANG Jun, LU Lixin. Characterization of In-Plane Platean Stress for Honeycomb Paperboard[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 354-359, 365.
- [11] 肖 博, 王 军. 动态冲击下芯子缺失蜂窝纸板的力学行为[C]//中国力学大会2015论文摘要集. 上海: 中国力学学会, 2015: 1.
XIAO Bo, WANG Jun. Mechanical Behavior of Honeycomb Paperboard with Missing Core Under Dynamic Impact[C]//Summary of 2015 Chinese Conference on Mechanics. Shanghai: Chinese Conference on Mechanics, 2015: 1.
- [12] 刘 冰, 于志彬, 陈志周. 基于蜂窝-瓦楞复合纸板的空调室外机缓冲包装设计[J]. 中国包装工业, 2015(15): 32-33.
LIU Bing, YU Zhibin, CHEN Zhizhou. Design of Cushioning Packaging for Outdoor Air Conditioner Based on Honeycomb-Corrugated Composite Cardboard[J]. China Packaging Industry, 2015(15): 32-33.
- [13] 张绍云, 储 火, 卢富德, 等. 蜂窝-泡沫缓冲系统动力学有限元分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 52-54, 63.
ZHANG Shaoyun, CHU Huo, LU Fude, et al. Finite Element Analysis for Dynamic Response of Cushioning System Made Out of Honeycomb Paperboard and Foam[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 52-54, 63.
- [14] 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 Guangjun, XIE Yong, LI Fengling. Cushioning Property of Combination Packaging Cushion[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(17): 108-111.
- [15] 王新春, 马大为, 庄文许, 等. 某空投装备在不同缓冲装置下的冲击响应分析[J]. 包装工程, 2013, 34(13): 47-51.
WANG Xinchun, MA Dawei, ZHUANG Wenxu, et al. Impact Response Analysis of Airdrop Equipment with Different Buffer Device[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(13): 47-51.

- [16] 彭国勋. 物流运输包装设计 [M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012: 91-96.
PENG Guoxun. Packaging Design of Logistics Transportation[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012: 91-96.
- [17] 汤伯森. 包装动力学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 19.
TANG Bosen. Packaging Dynamics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 19.
- [18] 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 Guangjun, ZHAO Dejian, XIAO Yingzhe, et al. Discussion and Analysis on Mathematical Connotation of Cushioning Packaging Design Method[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 64-67.
- [19] 黄蜜, 吴淑芳, 杜启祥. EBE 楞瓦楞纸板缓冲曲线研究 [J]. 包装工程, 2011, 32(13): 28-31.
HUANG Mi, WU Shufang, DU Qixiang. Cushion Curve Study of Corrugated Paperboard with EBE-Flute[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13): 28-31.
- [20] 李光, 樊明. 一种新型蜂窝纸板包边工艺及其制品缓冲性能研究 [J]. 包装学报, 2015, 7(3): 40-45.
LI Guang, FAN Ming. Analysis of a New Overlapping Technique for Honeycomb Paperboard and Its Energy Absorption Performance[J]. Packaging Journal, 2015, 7(3): 40-45.

Analysis of Buffer Curve of Honeycomb Paperboard

HUA Guangjun^{1,2}, CHEN Wan¹, LU Fude¹, JIANG Haiyun¹

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

2. Dongguan Jia Yi Co., Ltd., Dongguan Guangdong 523000, China)

Abstract: The characteristics of the stress-strain curve and cushion coefficient-maximum stress curve of typical cushioning materials and honeycomb paperboard were analyzed. The cushion pad design method of honeycomb paperboard based on cushion coefficient-maximum stress was put forward. The research showed that the stress-strain curve of the typical cushioning material was monotonic increasing variation. The stress-strain curve of the honeycomb paperboard was complicated, which could be classified into linear bearing stage, buckling stage and densification stage. The cushion coefficient-maximum stress curve of the honeycomb paperboard was irregular. The cushion coefficient was large in linear bearing stage and the buffering efficiency was small. In this stage, it was suggested that the honeycomb paperboard be used with other cushioning materials. The characteristic of the buckling stage was that the cushion coefficient and stress were small and the buffering efficiency was high, and the cushion curve must surpass the peak stress of the linear bearing stage. In this stage, the maximum stress should be calculated according to the peak stress of the linear bearing stage. In the densification stage, the material bore greater stress, which was not conducive to the protection of the products. Prepressure honeycomb paperboard lost part of the load capacity in the linear bearing stage. The cushion coefficient-maximum stress curve was smooth. The cushioning liner design could be carried out according to the classical pad design method.

Keywords: honeycomb paperboard; cushion coefficient; stress-strain curve; cushion pad