

能量吸收图法在蜂窝纸板中的应用

宋卫生

(河南牧业经济学院, 郑州 450046)

摘要: **目的** 研究能量吸收图法在蜂窝纸板中可行的应用方法。**方法** 通过以肩部包络线构成能量吸收图的方法和以屈服对应点连线构成能量吸收图的方法对同一个算例进行分析, 分别得到各自最佳的蜂窝纸板厚度和单层芯纸厚度。然后以产品的最大许用应力分别进行压缩, 查看其压缩变形情况。采用跌落的方法查看其最大变形、产品动能的变化曲线、位移变化曲线和加速度变化曲线, 以此来考查这2种方法的可行性。**结果** 通过肩点法得到优化结果, 由于产品最大许用应力小于蜂窝板的屈服应力, 蜂窝板无法通过层叠变形吸收产品的跌落冲击能量, 使得产品响应加速度过大, 进而发生破损。通过屈服对应点法得到优化结果, 由于产品最大许用应力可以克服蜂窝板的屈服应力, 使得蜂窝板可以变形吸能, 并可以在达到产品最大许用应力前吸收完所有的能量, 可以有效地保护产品。**结论** 文中所用的屈服对应点法在不考虑实际安全系数的基础上, 将产品的最大许用应力对应于缓冲材料的屈服应力, 所得的优化材料可以有效地对产品起到缓冲保护作用。

关键词: 能量吸收图; 肩点; 最佳吸能点; 屈服应力; 蜂窝纸板

中图分类号: TB484.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)15-0015-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.15.003

Application of Energy Absorption Diagram in Honeycomb Paperboard

SONG Wei-sheng

(Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China)

ABSTRACT: The work aims to study the workable application method of energy absorption diagram in honeycomb paperboard. The same example was analyzed through the method of constructing the energy absorption diagram with the envelope of the shoulder and the method of forming energy absorption diagram by the connection of yield corresponding points. The best thickness of honeycomb cardboard and the thickness of single layer core paper were obtained respectively. Then, the two different honeycomb paperboards were compressed with the maximum allowable stress of the product and the compressive deformation was viewed. The maximum deformation mode, the variation curve of the kinetic energy of the product, the displacement curve and the acceleration change curve were also examined by the drop method. The feasibility of these two methods was examined through the aforesaid analysis and comparison. The optimization results were obtained by the method of shoulder point. Because the maximum allowable stress of the product was less than the yield stress of the honeycomb paperboard, the honeycomb paperboard could not be deformed to absorb energy of the product's drop impact, thus causing the product to be damaged due to the excessively large response acceleration of the product. The optimization results were obtained by the method of yield corresponding point. Because the maximum allowable stress of the product could overcome the yield stress of the honeycomb paperboard, so that the honeycomb paperboard could be deformed to absorb the energy, absorb all the energy before reaching the maximum allowable stress of the product and protect the product effectively. On the basis of not considering the actual safety factor, the proposed yield corresponding point method has the maximum allowable stress of the product corresponded to the yield stress of the cushioning material. The optimized material obtained can effectively protect the product from the buffering.

KEY WORDS: energy absorption diagram; shoulder point; the best energy absorption point; yield stress; honeycomb paperboard

收稿日期: 2018-03-30

作者简介: 宋卫生 (1980—), 男, 河南牧业经济学院副教授, 主要研究方向为包装工程与仿真分析。

多孔缓冲材料质轻、强度高、缓冲性能优良,在航空航天、汽车、建筑、包装等行业均得到了广泛的应用^[1]。多孔缓冲材料吸能特性的表征方法有缓冲曲线、缓冲系数、Janssen 因子、Rusch 曲线、能量吸收率曲线和能量吸收图。Maiti 等在 1984 年提出了能量吸收图法在多孔材料中的应用^[2]。Gibson 等在 1997 年给出了构建能量吸收图的操作方法与步骤^[3]。由于能量吸收图可以汇集应变率、材料结构特性、温湿度等多种信息,能够模型化,所以对于不同相对密度的多孔缓冲材料吸能特性的表征有较高普适性^[4],逐渐成为国内外学者研究多孔缓冲材料缓冲性能的主要手段。

在国内,孙德强引入能量吸收图法进行缓冲包装设计,设计了相应完整系统的设计流程,并根据该流程设计开发了基于能量吸收图的缓冲包装设计系统软件^[5]。王志华利用能量吸收图法研究了泡沫铝合金的动态力学性能^[6]。鄂玉萍利用能量吸收图研究了相对湿度和应变率对纸质缓冲材料能量吸收特性的影响^[7]。吴莎构建了瓦楞纸板的能量吸收图,并在此基础上研究了在结构类缓冲垫设计中的应用方法^[8]。王军构建了含应变速率、蜂窝结构及环境湿度等信息的动、静态压缩能量吸收图,研究了厚跨比、相对湿度以及低中应变率下应变率对蜂窝纸板的面外承载及能量吸收性能的影响^[9]。王志伟利用能量吸收图法研究了纸浆模塑制品的冲击承载能力^[10]。

1 蜂窝类材料能量吸收过程的特点

蜂窝纸板的应力应变曲线见图 1,对于未经过预压的纸蜂窝类缓冲材料,应力应变曲线中的应力变化并非单调递增,其屈服应力 A 点高于平台应力,即外应力必须大于蜂窝板的屈服应力,蜂窝芯纸才能屈服变形,从顶部向底部逐层叠加,这个层叠的过程可以起到吸收外界冲击能量的作用^[11]。由此,应选择屈服应力作为被包装产品的最大许用应力。从屈服点 A

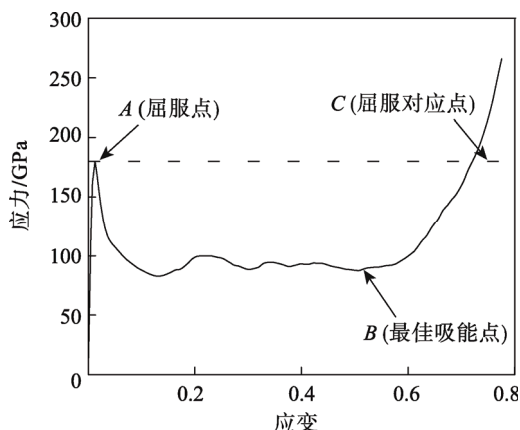


图 1 蜂窝纸板的应力应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of honeycomb paperboard

画一条横线,与应力应变曲线的密实段有 1 个交点 C (以下统称为屈服对应点)。屈服对应点在应力应变曲线上比肩点更加靠右,屈服对应点处吸收的能量也比肩点处吸收得更多,同时缓冲包装材料能够通过变形有效地吸收产品的冲击能量。

经实验验证,蜂窝纸板能量吸收图的另一个特点是能量吸收曲线肩部包络线并不是直线,同族包络线之间也存在交叉现象。根据能量吸收图进行缓冲包装设计的前提是肩部包络线是直线,而且同族包络线之间相互平行。由此,文中只选择 2 个点确定 1 条包络线,以保证验证可以进行。

2 肩点法与屈服对应点法的对比分析

以一个实际的算例来对比上述 2 种方法:肩点法,以肩部包络线构成能量吸收图的方法;屈服对应点法,以及以屈服对应点连线构成能量吸收图的方法。

某产品质量为 5.68 kg,产品下部垫衬蜂窝纸板进行缓冲保护,产品与蜂窝纸板的接触面积约为 76.2 cm²,产品的脆值为 70g,选择的蜂窝原纸的弹性模量 E_s 为 2.51 GPa,蜂窝纸板胞元边长为 0.01 m,跌落高度为 0.3 m。要求优化得出蜂窝纸板的最佳厚度和单层胞壁厚度。

2.1 肩点法的优化及验证过程

2.1.1 利用肩点法进行蜂窝板及其芯纸厚度的优选

当跌落高度为 0.3 m 时得到跌落冲击的初始速度为 2.45 m/s,冲击能量为 17 J。因为被包装物的脆值 a 为 70g,产品与蜂窝纸板的接触面积约为 76.2 cm²,那么产品的最大许用应力 σ_p 为 538 kN/m²,蜂窝原纸的弹性模量 E_s 为 2.51 GPa^[12],则最大许用标准化峰应力 $\sigma_p/E_s=2.14 \times 10^{-4}$ 。

文中利用迭代法^[13]对蜂窝纸板的厚度及芯纸的单层厚度进行优选,在前后 2 次的厚度之差小于 10% 时便可收敛,得到所求蜂窝纸板的厚度。迭代过程中需要进行应变率求解和厚度的迭代计算。

应变率公式^[14]为:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\delta}{dt} = \frac{d\delta}{dt} \cdot \frac{1}{\delta} = \frac{v}{\delta} \quad (1)$$

式中: δ 为蜂窝纸板厚度; v 为冲击压缩速度。

蜂窝纸板所吸收的总能量与单位体积的能量吸收,产品与蜂窝板的接触面积,蜂窝板的厚度之间的关系^[15]:

$$\delta = \frac{U}{WA} \quad (2)$$

式中: U 为蜂窝纸板所吸收的总能量; W 为单位体积的吸收能量; A 为产品与蜂窝板的接触面积。

在第 1 次迭代中, 选择纸板厚度 δ_1 为 0.05 m, 由式 (1) 可得压缩过程的应变率为 49 s^{-1} , 在该应变率下分别对 0.246, 0.275 mm 这 2 个不同芯纸单层厚度的蜂窝板进行压缩实验, 得到能量吸收图的包络线。标准化峰应力 σ_p 对应的单位体积的吸能量为 $3.06 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ 。

由第 1 次迭代所得的单位体积吸能量 ($W = 3.06 \times 10^5 \text{ J/m}^3$) 和式 (2) 可得, 纸板厚度 $\delta_2 = 7.3 \text{ mm}$ 。在 0.3 m 的跌落高度前提下, 跌落冲击的初始速度为 2.45 m/s, 文中以匀速压缩来得到应力应变曲线以及能量吸收曲线, 因此设定压缩速度为初始速度 (2.45 m/s), 由式 (1) 可算出新的应变率为 336 s^{-1} 。在该应变率下分别对 0.246, 0.275 mm 这 2 个不同芯纸厚度的蜂窝板进行压缩实验, 得到能量吸收图的包络线。标准化峰应力 σ_p 对应的单位体积吸能量为 $3.28 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ 。

由式 (2) 可得 δ_3 为 6.8 mm。 δ_3 和 δ_2 之间的误差为 6.8%, 小于 10%, 因此确定 6.8 mm 为最优蜂窝纸板厚度。可以确定所需芯纸单层厚度的缓冲材料在应变率为 336 s^{-1} 时, 在标准化应力为 2.14×10^{-4} 时, 所对应的标准化能量为 $1.31 \times 10^{-4} \text{ J/(m} \cdot \text{N)}$ 。

利用逼近法确定缓冲材料所需的单层厚度, 首先在应变率为 49 和 336 s^{-1} 下求 0.246, 0.275 mm 这 2 个不同芯纸厚度缓冲材料能量吸收曲线中肩点的包络线。文中以不同应变率的同族肩部包络线相互平行为基础, 因此可以从坐标为 $(2.14 \times 10^{-4}, 1.31 \times 10^{-4})$ 的点作 1 条与 49 和 336 s^{-1} 这 2 个应变率条件下所得的肩部包络线的平行线, 见图 2。

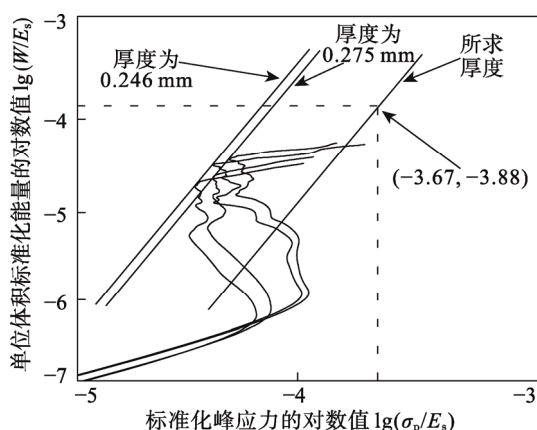


图 2 单层芯纸厚度为 0.246 和 0.275 mm 的蜂窝纸板能量吸收曲线的包络线

Fig.2 Envelope of energy absorption curve of honeycomb paperboard with single core paper thickness of 0.246 and 0.275 mm

接下来改变芯纸厚度, 得到其能量吸收曲线, 所求芯纸单层厚度的蜂窝纸板的能量吸收曲线肩点落在图 2 中厚度的包络线上。这里从 0.5 和 0.8 mm 两端进行夹逼, 在此基础上对 0.7 和 0.65 mm 的单层厚度进

行测试, 其能量吸收曲线见图 3。由图 3 可以看出, 0.65 mm 芯纸厚度材料能量吸收曲线的肩部落在了所需厚度的包络线上, 即 0.65 mm 为所求的芯纸厚度。

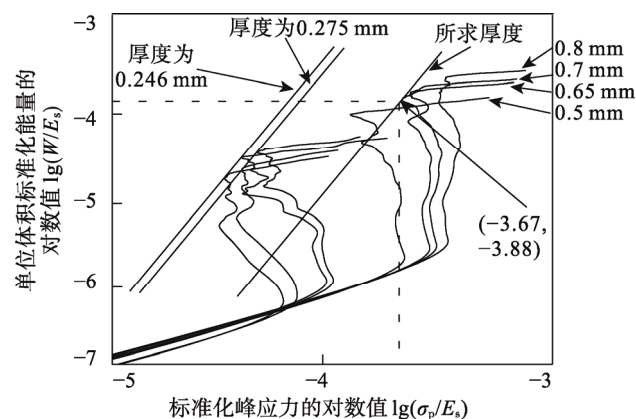


图 3 单层芯纸厚为 0.5, 0.65, 0.7, 0.8 mm 的蜂窝纸板能量吸收曲线

Fig.3 Energy absorption curves of honeycomb paperboard with single layer core paper thickness of 0.5, 0.65, 0.7, 0.8 mm

2.1.2 对优选结果的验证

文中用产品最大许用应力对所选的蜂窝纸板进行压缩试验, 验证在最大许用应力条件下, 蜂窝纸板能否有效变形并进行吸能。然后用跌落冲击试验测定产品在跌落过程中的最大加速度, 看其是否超过产品的脆值。用产品最大许用应力乘以接触面积得到压缩力的大小为 4100 N, 用 4100 N 压缩纸板高度为 6.8 mm, 芯纸厚度为 0.65 mm 的蜂窝纸板。

试样在最大许用应力压缩过程中产品的位移变化曲线见图 4, 由图 4 可以看出, 其变形只有 0.4 mm, 远远小于 6.8 mm 的蜂窝纸板厚度, 产品的最大许用应力无法使得蜂窝纸板进行层叠变形, 进而无法有效吸收产品的冲击能量。

接下来通过跌落实验进行验证, 自由跌落高度设为 0.3 m。

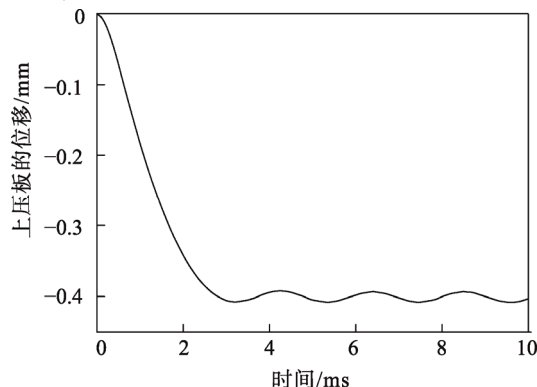


图 4 试样在最大许用应力压缩过程中产品的位移变化曲线

Fig.4 Displacement curve of the product in the process of compression under the maximum allowable stress of the samples

试样在跌落过程中的产品加速度变化曲线见图5,最大加速度的最大值为 1220.5 m/s^2 ,即 $124.54g$,明显大于产品的脆值 $70g$,因此在跌落过程中必然会使产品破损。

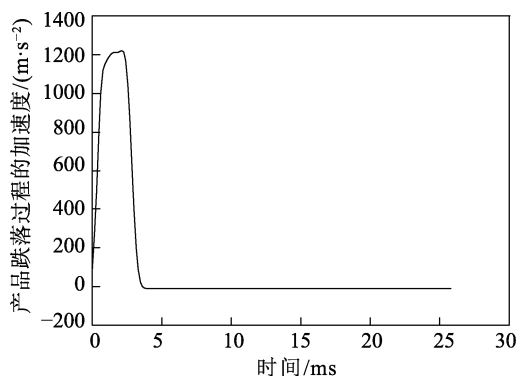


图5 试样在跌落过程中的产品加速度的变化曲线
Fig.5 The change curve of the acceleration of the product during the falling process of the samples

2.2 屈服对应点法的分析及验证过程

2.2.1 利用屈服对应点法进行蜂窝板及其芯纸单层厚度的优选

下面用屈服对应点法对上述算例进行分析,并用压缩和跌落的方法进行验证。

在第1次迭代过程中,仍然选择纸板厚度 δ_1 为 0.05 m ,并根据冲击速度 2.45 m/s ,可得压缩过程的应变率为 49 s^{-1} ,在该应变率下分别对芯纸单层厚度为 $0.246, 0.275 \text{ mm}$ 的蜂窝板进行压缩实验。芯纸单层厚度为 0.246 mm 的试样,其能量吸收曲线屈服对应点所对应的标准化应力和标准化能量分别为 $6.83 \times 10^{-5}, 2.861 \times 10^{-5} \text{ J/(m} \cdot \text{N)}$;芯纸单层厚度为 0.275 mm 的试样,其能量吸收曲线屈服对应点所对应的标准化应力和标准化能量分别为 $7.94 \times 10^{-5}, 3.47 \times 10^{-5} \text{ J/(m} \cdot \text{N)}$ 。对以上2个屈服对应点进行连线,可以得到以能量吸收图的屈服对应点为连线的“包络线”。为方便标点,对坐标刻度取了以10为底的对数值。由包络线可以求得标准化峰应力所对应的单位体积吸能为 $2.634 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ 。

由式(2)进一步迭代可得 $\delta_2 = 8.47 \text{ mm}$,在冲击压缩速度为 2.45 m/s 的前提下,修正的应变率为 289 s^{-1} 。在该应变率下分别对芯纸厚度为 $0.246, 0.275 \text{ mm}$ 的蜂窝板进行压缩实验,可得在此应变率下的包络线。峰应力所对应的单位体积的吸能量为 $2.8363 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ 。

再次由式(2)迭代可得 $\delta_3 = 8.14 \text{ mm}$,与 δ_2 之间的误差为 3.6% ,小于 10% ,因此确定 $8.14 \times 10^{-3} \text{ m}$ 为最优蜂窝纸板单层厚度。

接下来利用逼近法确定缓冲材料所需的单层厚度,首先在应变率为 49 和 289 s^{-1} 下求 $0.246, 0.275$

mm 这2个不同芯纸厚度缓冲材料能量吸收曲线中屈服对应点的包络线。这里以不同应变率的屈服对应点包络线平行为基础,可以从坐标为 $(2.14 \times 10^{-4}, 1.13 \times 10^{-4})$ 的点作1条与 49 和 289 s^{-1} 这2个应变率条件下所得的肩部包络线的平行线,接下来分别对芯纸单层厚度为 0.65 和 0.5 mm 的蜂窝纸板进行压缩测试,得到其屈服对应点坐标分别为 $(2.81, 1.76)$ 和 $(2.21, 1.15)$,见图6。单层芯纸厚度为 0.5 mm 的蜂窝纸板的屈服对应点坐标与经过所求厚度的包络线极为接近,可以认为 0.5 mm 为所求蜂窝板的单层芯纸厚度。

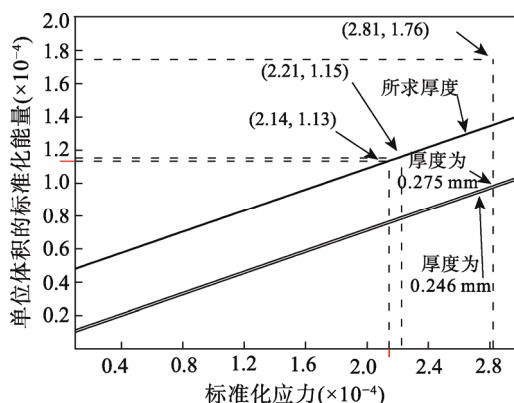


图6 所求单层芯纸厚度蜂窝纸板的包络线及单层芯纸厚度为 0.5 和 0.65 mm 的蜂窝纸板的屈服对应点在能量吸收图中的坐标位置

Fig.6 Envelope of energy absorption curve of honeycomb paperboard with required single core paper thickness and the coordinate position of the yield corresponding point of honeycomb paperboard with the single core paper thickness of 0.5 and 0.65 mm in the energy absorption diagram

2.2.2 对优选结果的验证

使用单层胞壁厚度为 0.5 mm ,蜂窝板厚度为 8.14 mm 的试样进行压缩实验和跌落实验,对所选结果进行验证。

试样在最大许用应力压缩过程中产品的位移变化曲线见图7,可以看出,产品的最大许用应力可以克服蜂窝纸板的屈服应力,使得蜂窝纸板进行层叠变形,进而可以有效吸收产品的冲击能量。接下来通过跌落实验进一步验证跌落过程中最大加速度是否超过产品的脆值,跌落实验的设置条件同上。

试样在跌落过程中的产品加速度的变化曲线见图8,可知最大加速度的最大值为 652.71 m/s^2 ,即 $66.6g$,小于产品的脆值 $70g$,因此产品在跌落过程不会破损。从以上验证试验可以看出,产品最大许用应力可以克服通过屈服对应点法所得到的优化蜂窝板的屈服应力,使得蜂窝板可以变形吸能,并可在达到产品最大许用应力之前吸收完所有的能量,可有效保护产品。由此,以屈服应力为参考对蜂窝纸板进行缓冲设计可以有效保护产品。

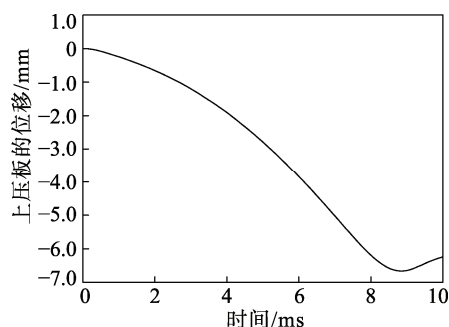


图7 试样在最大许用应力压缩过程中产品的位移变化曲线

Fig.7 Displacement curve of the product in the process of compression under maximum allowable stress of the samples

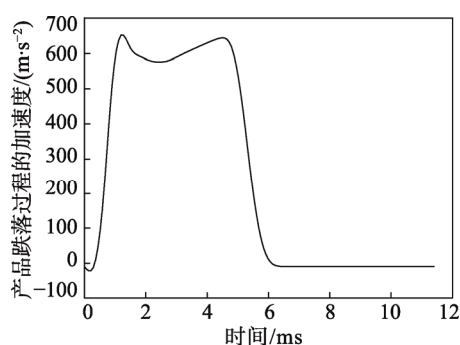


图8 试样在跌落过程中的产品加速度的变化曲线

Fig.8 The change curve of the acceleration of the product during the falling process of the samples

3 结语

通过使用能量吸收图的肩点法和屈服对应点法对同一算例进行分析和结果验证可以看出,由于蜂窝板的应力应变曲线并非单调递增,其屈服应力高于平台应力,也高于最佳吸能点所对应的应力,所以若以最佳吸能点所对应应力为产品的最大许用应力,在跌落冲击过程中无法克服蜂窝纸板的屈服应力,无法使蜂窝纸板层叠变形和有效地吸收产品的冲击能量,使得产品在跌落过程中遭受更大的冲击加速度,即使用该方法所得的蜂窝纸板也无法有效保护产品。如果冲击使得蜂窝层叠变形,那么应力也必然超过了屈服应力,更超过了产品的最大许用应力,产品同样造成破损。屈服对应点法是将产品的最大许用应力对应于缓冲材料的屈服应力,因此在跌落冲击过程中,可以克服屈服应力,并顺利进入平台吸能区,有效地吸收产品的冲击能量,同时又不超过产品的最大许用应力,该方法所得的优化材料可以有效地对产品起到缓冲保护作用。

参考文献:

[1] 范建辉. 新型多孔金属材料动力学行为的有限元分

析[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.

FAN Jian-hui. Finite Element Analysis of the Dynamic Behavior of a New Porous Metal Material[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.

[2] MAITI S K, GIBSON L J, ASHBY M F. Deformation and Energy Absorption Diagrams for Cellular Solids[J]. Acta Metallurgica, 1984, 32(2): 1963—1975.

[3] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Oxford: Cambridge University Press, 1997.

[4] 王冬梅, 罗陈, 刘映平. 多孔材料缓冲吸能特性表征方法[J]. 功能材料, 2007, 38(10): 3853—3855.

WANG Dong-mei, LUO Chen, LIU Ying-ping. Evaluation Methods on Cushioning and Energy Absorption Properties of Cellular Material[J]. Functional Materials, 2007, 38(10): 3853—3855.

[5] 孙德强. 缓冲防护材料计算机辅助优化设计系统[J]. 陕西科技大学学报, 2006, 24(4): 60—66.

SUN De-qiang. Computer Aided Design System of Cushioning Materials[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2006, 24(4): 60—66.

[6] 王志华. 泡沫铝合金动态力学性能及其吸能机理的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2005.

WANG Zhi-hua. Studies on the Dynamic Mechanical Properties and Energy Absorption of Aluminum Alloy Foams[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2005.

[7] 鄂玉萍. 湿度和应变率对纸质缓冲材料能量吸收特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2010.

E Yu-ping. Influence of Humidity and Strain Rate on the Energy Absorption Properties of Paper Cushioning Materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.

[8] 吴莎. 能量吸收法在结构类缓冲垫设计中的应用研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012.

WU Sha. Research on the Application for Energy Absorption Method in the Design of Structural Cushioning Pad[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2012.

[9] 王军. 蜂窝纸板承载/缓冲机理及其性能表征[D]. 无锡: 江南大学, 2011.

WANG Jun. Cushioning Mechanism and Characterization of Bearing for Honeycomb Paperboard[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.

[10] 王志伟. 纸浆模塑制品冲击承载能力和能量吸收分析[J]. 应用力学学报, 2013, 30(4): 593—597.

WANG Zhi-wei. Analysis for Impact Load Carrying Capacity and Energy Absorbing of Molded Pulp Products[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013,

- 30(4): 593—597.
- [11] 申波. 基于能量吸收图法的缓冲包装设计系统[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- SHEN Bo. A Cushioning Package Design System Based on Energy Absorption Diagrams Method[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [12] 任亚东. 能量吸收法在缓冲包装设计中的应用研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2010.
- REN Ya-dong. Energy Absorption Method in Cushioning Package Application and Research[D]. Xi'an: Shaanxi University of Technology, 2010.
- [13] 孙德强. 基于能量吸收图法的缓冲包装材料优化设计[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(4): 411—414.
- SUN De-qiang. Optimal Design of Materials for Cushioning Packaging Based on Energy Absorption Diagrams[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(4): 411—414.
- [14] 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 Zhi-wei. Energy-absorption Diagrams of Honeycomb Paper Boards under Dynamic Compression in Different Relative Humidity[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(23): 203—206.
- [15] 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.
- WANG Jun, LU Li-xin. Characterization of In-plane Platform Stress for Honeycomb Paperboard[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 354—359.