

应力-能量法求取泡沫塑料缓冲曲线时函数模型的研究

王金梅, 刘乘

(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 研究快速获得缓冲材料任意高度、任意厚度的静应力-最大加速度曲线族的方法。**方法** 先利用传统方法, 得到一条静应力-最大加速度曲线。然后选用同样材料, 根据应力-能量法的原理与步骤求得5组动能量与动应力值, 根据散点图推测函数为多项式, 或者含指数项。利用 Matlab 编程求得动能量与最大加速度的多项式、指数拟合函数模型, 从而求出静应力与最大加速度的函数关系。**结果** 求取的多项式、指数拟合函数模型与传统方法获得的实验值相比均存在一定误差, 相比较而言, 多项式拟合的数据与实际试验得到的数据误差较小。**结论** 在精确度要求不严格的场合下, 应力-能量法不失为一种简便、有效的方法。

关键词: 应力-能量法; 缓冲材料; 函数模型; 最大加速度-静应力曲线

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)05-0079-04

Function Models of the Stress-energy Method in Determining Cushion Curves of Foam Materials

WANG Jin-mei, LIU Cheng

(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: **Objective** To study a quick and easy method for getting $\sigma_m - \sigma_{st}$ curves of cushion materials of any height and thickness. **Methods** Using the traditional method to get a $\sigma_m - \sigma_{st}$ curve and the same cushion material to obtain five values of dynamic energy and dynamic stress according to the principle and steps of stress-energy method. Through Matlab programming, the function of static force and maximum acceleration was obtained by the polynomial and exponential fitting function models of dynamic energy and maximum acceleration. **Results** Compared with the traditional values, there were some errors in the polynomial and exponential fitting function models, and the error in the polynomial function model was smaller. **Conclusion** The results showed that the stress-energy method is more efficient in getting $\sigma_m - \sigma_{st}$ curves of cushion materials of any height and thickness, when the accuracy requirement is not very high.

KEY WORDS: stress-energy method; cushion materials; function models; $\sigma_m - \sigma_{st}$ curves

缓冲设计通常建立在对环境条件的统计数据处理结果、产品脆值测定和缓冲材料特性等试验的基础上^[1], 包装设计一般要求设计脆值大于许用脆值^[2], 且动态冲击缓冲曲线是产品缓冲包装设计的重要参考依据^[3]。传统泡沫塑料缓冲曲线通过缓冲材料跌落试验机来测定, 试验需要5组试样, 每组5块, 每块

样品至少跌落5次。要获取一条最大加速度-静应力曲线至少需做125次跌落试验, 耗时费力, 且测定曲线范围有限^[4-6]。

针对传统方法求取缓冲材料最大加速度-静应力曲线的缺陷, 美国 Hewlett-Packard 公司研发中心 Matthew Datum 等人从能量耗散物理机制、材料缓冲

吸收机能和模型分析等角度出发,提出了测定泡沫塑料缓冲曲线的快速预测法:应力-能量法。

1 应力-能量法求取缓冲材料缓冲曲线的原理^[7]

应力-能量法根据能量守恒定律,并以缓冲材料受到冲击过程中没有能量损失为前提,认为重锤在跌落过程中产生的势能转化为动能全部被缓冲材料吸收。在大量试验的基础上,推出经验公式:

$$E = \sigma_{st} h / t \tag{1}$$

式中: E 为动能量; σ_{st} 为静应力; h 为跌落高度; t 为缓冲材料厚度。

因为 $\sigma_m = G_m \sigma_{st}$,显然 σ_m 与 E 存在一定的函数关系,假设 $\sigma_m = f(E)$,则

$$G_m = f(E) / \sigma_{st} \tag{2}$$

若要测定某种材料的缓冲曲线,只需要一组试样,计算得到 σ_{st} ,并测得相应的 G_m ,建立函数模型 $f(E) = G_m \times \sigma_{st}$,就可以在理论上求出这种材料在任意高度、任意厚度的静应力-最大加速度曲线族^[8]。

2 利用传统方法测定泡沫塑料缓冲曲线^[9]

为了验证应力-能量法,选择密度为 0.0143 g/cm³,厚度为 48 mm 的 EPS 作为试验对象,跌落高度为 60 cm,利用传统方法,在 DY2 冲击试验机上得到一条静应力-最大加速度曲线,见图 1。

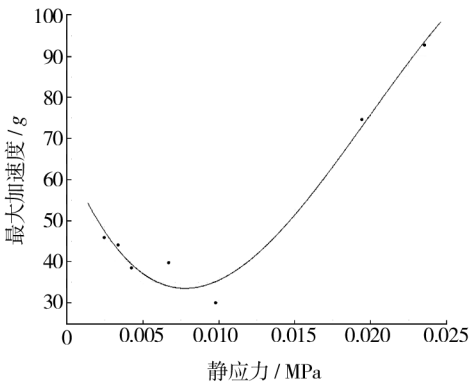


图 1 最大加速度-静应力曲线

Fig. 1 The maximum acceleration versus static stress curve

由图 1 可知,曲线最低点坐标为 (0.008 125 MPa,33 g)。

3 利用应力能量法测定泡沫塑料缓冲曲线

3.1 试验方法

为了与传统方法测定的缓冲曲线作比较,同样选用密度为 0.0143 g/cm³ 的 EPS 作为研究对象。

$$\sigma_{st} = W / A \tag{3}$$

式中: W 为重锤重量; A 为试样接受冲击的表面积。为了精确,选择 5 个 W, A, h, t 相同的缓冲材料作为一组,且每组单个试样进行 5 次冲击实验,求取最大加速度平均值,得到一组对应的 G_m, E 值,划分能量范围,选取不同的能量值。重复上述过程,测出对应的 G_m, E ^[10]。

该实验测得 5 组实验数据,见表 1。

表 1 动能量和动应力计算值

Tab.1 Calculated values of dynamic energy and dynamic stress

冲击高度/m	静态载荷/kPa	材料厚度/m	冲击加速度/g	动应变能量 $E / (kN \cdot m^{-2})$	动应力 /kPa
0.7644	2.135	0.48	91.8836	34	196.1715
0.424	11.76	0.48	29.4854	103.88	346.7483
0.624	13.39	0.48	60.9968	174.07	816.7472
1.09	10.745	0.48	156.3692	244	1680.1871
1.015	14.849	0.48	184.3742	314	2737.7725

3.2 函数模型的建立^[11]

画出动能量-动应力散点图,通过图表判断其数学形式,见图 2。

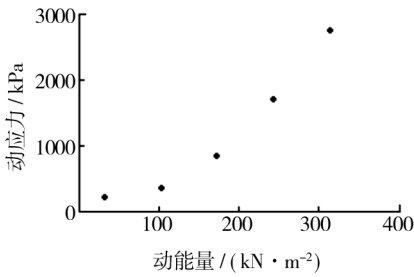


图 2 动能量-动应力散点

Fig. 2 Scatter diagram of dynamic energy versus dynamic stress

由图 2 可知,全段 5 个点呈曲线分布,根据函数的性质,可推测曲线函数可能为多项式,或者含指数项^[12]。

3.2.1 多项式函数模型及其待定参数^[13-14]

调用 Matlab 多项式拟合函数 polyfit, 对 G_m, E 进行拟合(见图 3), 得到:

$f(E)=0.032\ 189\times E^2-2.0359\times E+219.75\quad (4)$

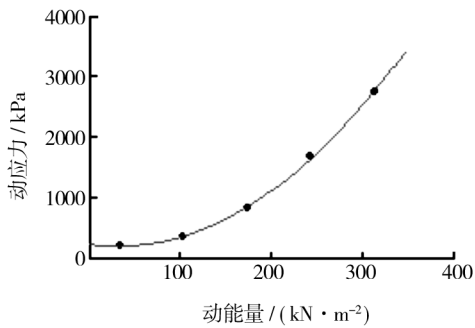


图 3 多项式函数拟合曲线
Fig.3 Polynomial fitting curve

由公式(2), 知

$G_m=\frac{f(E)}{\sigma_{st}}=\frac{0.032\ 189\times E^2-2.0359\times E+219.75}{\sigma_{st}}\quad (5)$

得到静应力-最大加速度曲线见图 4。

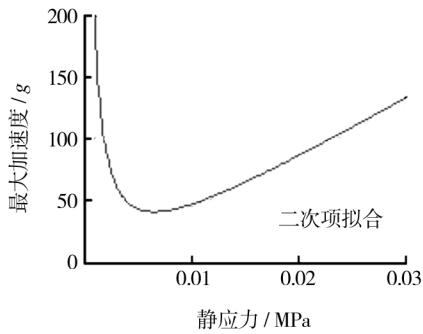


图 4 多项式模型最大加速度-静应力曲线
Fig.4 The maximum acceleration versus static stress curve of polynomial model

3.2.2 含指数的数学模型

1) 2 参数指数模型。

设函数模型为: $f(E)=ae^{bE}$ ^[15]

调用 Matlab 程序:

myfun1=inline('b(1)*exp(b(2)*E)','b','E');
b=nlinfit(E,Sm,myfun1,[150,0]); 见图 5。

得:

$f(E)=186.09e^{0.008\ 626\ 6E}\quad (6)$

则由公式(2)得:

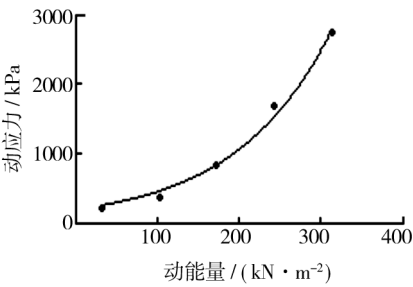


图 5 2 参数指数函数拟合曲线
Fig.5 The 2-parameter exponential function fitting curve

$G_m=\frac{f(E)}{\sigma_{st}}=\frac{186.09e^{0.008\ 626\ 6E}}{\sigma_{st}}\quad (7)$

得到静应力-最大加速度曲线见图 6。

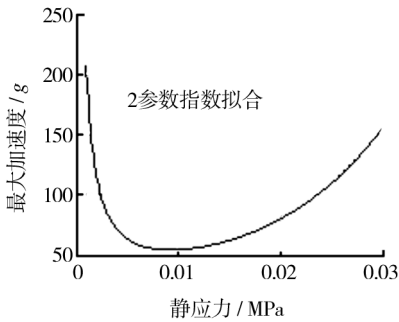


图 6 2 参数指数模型最大加速度-静应力曲线
Fig.6 The maximum acceleration versus static stress curve of 2-parameter exponential model

2) 3 参数指数模型。

设函数模型为: $f(E)=a_0+ae^{bE}$

调用 Matlab 程序, 得到

myfun=inline('a(1)+a(2)*exp(a(3)*E)','a','E');
a=nlinfit(E,Sm,myfun,[0,0.1,0]); 见图 7。

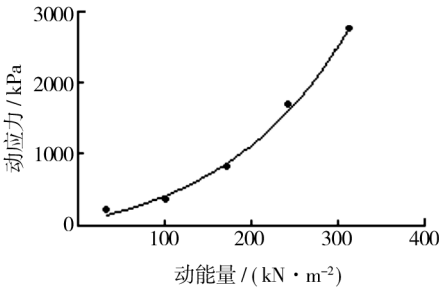


图 7 3 参数指数函数拟合曲线
Fig.7 The 3 parameter exponential function fitting curve

得:

$f(E)=-325.23+365.74e^{0.006\ 795E}\quad (8)$

则由公式(2)得到:

$$G_m = \frac{f(E)}{\sigma_{st}} = \frac{-325.23 + 365.74e^{0.006795E}}{\sigma_{st}} \quad (9)$$

得到静应力-最大加速度曲线见图 8。

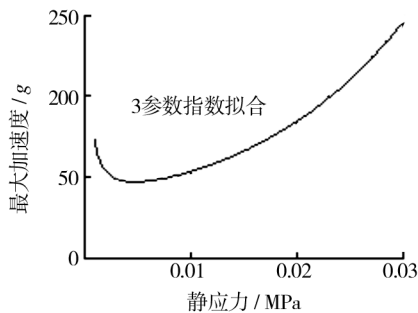


图 8 3 参数指数模型最大加速度-静应力曲线

Fig. 8 The maximum acceleration versus static stress curve of 3 parameter exponential model

3.3 数据比较

将实际测定的数据与应力能量法求得的理论值进行比较,见表 2。

表 2 理论数据与实验数据比较

Tab.2 Comparison between theory and experiment data

	最小加速度/g	对应静应力/ MPa
实验数据	33	0.0081
多项式模型数据	41.05	0.0066
2 参数指数模型数据	54.38	0.0092
3 参数指数模型数据	48.83	0.0048

4 结语

3 个模型获得的缓冲曲线与实验数据均存在一定误差,相比较而言,多项式拟合的数据与实际试验得到的数据误差较小。试验会产生误差主要是因为应力-能量法提出的前提是缓冲材料在受到冲击的过程中没有能量损失,而实际上重锤冲击后反弹会带走部分能量。不论哪种模型,从实际应用的角度来说,设计包装本身就要求设计脆值大于许用脆值,因此在精确度要求不严格的场合下,应力-能量法不失为一种简便、有效的方法。

参考文献:

[1] 卢杰,焦丽娟,周廷美. 基于 LabVIEW 的缓冲材料动态压缩测试系统的设计[J]. 武汉理工大学学报,2010(8): 534—536.
LU Jie, JIAO Li-juan, ZHOU Ting-mei. Design of Dynamic Compression for Packaging Cushioning Materials Testing

System Based on LabVIEW[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010(8): 534—536.
[2] 徐人平,张晓龙,杨维平. 脆值的设计许用值研究[J]. 包装工程,2002,23(6): 15—17.
XU Ren-ping, ZHANG Xiao-long, YANG Wei-ping. Research on Design Permissible Value of Frailty[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(6): 15—17.
[3] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2006: 104—136.
PENG Guo-xun. Logistics and Transport Packaging Design [M]. Beijing: Printing Industry Press, 2006: 104—136.
[4] 山静民. 包装测试技术[M]. 北京: 印刷工业出版社, 1999: 115—116.
SHAN Jing-min. Package Testing Technology[M]. Beijing: Printing Industry Press, 1999: 115—116.
[5] 山静民. 材料缓冲性能测试的 GB 法和能量法[EB/OL]. http://www.testimpact.com/new_page_6.htm, 2011-05-26.
SHAN Jing-min. GB Cushioning Material Performance Testing Method and the Energy Method [EB/OL]. http://www.testimpact.com/new_page_6.htm, 2011-05-26.
[6] GB/T 8167—2008, 包装用缓冲材料动态压缩试验方法[S].
GB/T 8167—2008, Testing Method of Dynamic Compression for Packaging Cushioning Materials[S].
[7] MATTHEW D. A Simplified Process for Determining Cushion Curves[D]. Michigan: Michigan State University, 1999.
[8] 刘乘,刘晶. 应力-能量法在求取包装材料最大加速度-静应力曲线方面的应用分析[J]. 包装工程,2011,32(1): 82—83.
LIU Cheng, LIU Jing. Research on Stress-Energy Method Used in the Determination of Packaging Material's Buffer Characteristics[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 82—83.
[9] ASTM D1596, Dynamic Shock Cushioning Characteristics[S].
[10] 张波涛. 应力-能量法在测定泡沫塑料缓冲曲线中的应用[J]. 包装工程,2008,29(1): 59—65.
ZHANG Bo-tao. Application of the Stress-Energy Method in Determining Cushion Curves of Foam Materials [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 59—65.
[11] 王玲. 基于 MATLAB 的数据曲线拟合[J]. 天津职业院校联合学报,2009(5): 63—64.
WANG Ling. Data Curve Fitting Based on MATLAB[J]. Journal of Tianjin Vocational Institutes, 2009(5): 63—64.
[12] 张爱平. 基于 LabVIEW 设计曲线拟合仪[J]. 华北航天工业学院学报,2004(3): 5—6.

- ing,2011.
- [3] KAZUKI A,SHIGEKA Y,MASAAKI M,et al. Basic Investigation of Noncontact Transportation System for Large TFT-LCD Glass Sheet Used in CCD Inspection Section[J]. Precision Engineering,2011,35(1):58—64.
- [4] 钟飞,吴雪茹. 基于结构光和机器视觉的尺寸测量及其误差分析[J]. 包装工程,2011,32(9):66—69.
ZHONG Fei,WU Xue—ru. Size Measurement and Error Analysis of Machine Vision Based on Structured Light[J]. Packaging Engineering,2011,32(9):66—69.
- [5] 孔玲君,刘真,姜中敏. 基于 CCD 的数字印刷质量检测与分析技术[J]. 包装工程,2010,31(3):92—95.
KONG Ling—jun,LIU Zhen,JIANG Zhong—min. CCD—based Digital Print Quality Measurement and Analysis Techniques[J]. Packaging Engineering,2010,31(3):92—95.
- [6] 许旭萍,于跃飞,双文杰. 彩色印刷套准误差的自动检测研究[J]. 包装工程,2013,34(9):107—110.
XU Xu—ping,YU Yue—fei,SHUANG Wen—jie. Research of Automatic Registration Error Detection in Color Printing[J]. Packaging Engineering,2013,34(9):107—110.
- [7] 高翔,谷吉海. 基于 Canny 算法的啤酒空瓶杂质检测方法[J]. 包装工程,2009,30(3):63—65.
GAO Xiang,GU Ji—hai. Detection Method of Empty Beer Bottle Impurity Based on Canny Arithmetic[J]. Packaging Engineering,2009,30(3):63—65.
- [8] 杜晓强,王伟,王召巴. 玻璃厚度在线检测系统的研究[J]. 红外,2008,29(12):36—39.
DU Xiao—qiang,WANG Wei,WANG Zhao—ba. Research on On—line Glass Thickness Detection System[J]. Infrared,2008,29(12):36—39.
- [9] MICHELT B,SCHULZE J. 玻璃容器厚度非接触检测[J]. 玻璃与搪瓷,2010,38(2):38—40.
MICHELT B,SCHULZE J. The non—contact Measurement of the Thickness of the Glass Container[J]. Glass & Enamel,2010,38(2):38—40.
- [10] 丛赫曦,王书涛,李园园,等. 基于光反射的高温玻璃包装制品厚度在线检测技术[J]. 红外与激光工程,2011,40(7):1356—1359.
CONG He—xi,WANG Shu—tao,LI Yuan—yuan,et al. Online Thickness Measurement Technology for High Temperature Glass Based on Light Reflection[J]. Infrared and Laser Engineering,2011,40(7):1356—1359.
- [11] WANG Wei,WANG Zhao—ba. A Technical Research of Glass Thickness Detection Based on CCD Displacement Sensor[J]. Applied Mechanics and Materials,2012,229/231:1280—1283.
- [12] CONG He—xi,WANG Shu—tao,LI Yuan—yuan,et al. Online Thickness Measurement Technology for High Temperature Glass Based on Light Reflection[J]. Infrared and Laser Engineering,2011,40(7):1356—1359.
- [13] JIN Nong,ZHOU Shi—yu,CHANG Tzyy—shuh,et al. Identification of Influential Functional Process Variables for Surface Quality Control in Hot Rolling Processes[C]//IEEE Transactions on Automation Science and Engineering,2008.
- [14] 尹中会,李春. 玻璃包装制品成形过程中的 CCD 甄别原理及条件[J]. 包装工程,2013,34(19):114—117.
YIN Zhong—hui,LI Chun. The Principle and Conditions of Discriminating Glass Packaging Product in Forming Process by CCD[J]. Packaging Engineering,2013,34(19):114—117.
- [15] 葛绍岩. 热辐射性质及其测量[M]. 北京:科学出版社,1989.
GE Shao—yan. Thermal Radiation Properties and Its Measurement[M]. Beijing:Science Press,1989.
- [16] 张萌,林家明,杨隆荣,等. 超高感度 CCD 摄像传感器的特性分析[J]. 光学技术,2001,27(2):106—108.
ZHANG Meng,LIN Jia—ming,YANG Long—rong,et al. Characteristics Analysis for EXview HAD CCD Sensor[J]. Optical Technique,2001,27(2):106—108.

(上接第 82 页)

- ZHANG Ai—ping. The Design of Curve Fitting Instrument Based on LabVIEW[J]. Journal of North China Institute of Astronautic Engineering,2004(3):5—6.
- [13] 欧阳明松,徐连民. 基于 MATLAB 的试验数据拟合[J]. 南昌工程学院学报,2010(4):24—28.
OUYANG Ming—song,XU Lian—min. Fitting Method of Test Data Based on MATLAB[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology,2010(4):24—28.
- [14] 江禹. MATLAB 在曲线拟合中的应用[J]. 科技创新与应用,2012(18):8.
JIANG Yu. Application of MATLAB Curve Fitting[J]. Technology Innovation and Application,2012(18):8.
- [15] 路冰琳,孙诚,韩雪山. 运用数学拟合方法绘制动态冲击缓冲曲线的研究[J]. 包装工程,2010,31(15):4—6.
LU Bing—lin,SUN Cheng,HAN Xue—shan. Study on Drawing Dynamic Shock Cushioning Curve Based on Mathematic Fitting Method[J]. Packaging Engineering,2010,31(15):4—6.