

基于应力-能量法的缓冲包装材料性能研究

陈满儒, 刘兰

(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 研究不同密度衬垫材料的动态缓冲特性曲线获得方法, 获得不同密度衬垫材料的材料性能变化规律, 以提高测试效率。**方法** 针对不同密度的 EPS 进行动态压缩实验, 通过对比不同密度下应力-能量方程的关键材料常数 a 和 b , 进行材料常数在密度不同时变化曲线拟合, 分析材料不同密度之间 a 和 b 的变化趋势。**结果** 经过多次不同函数类型的曲线拟合及对比分析, 得到衬垫材料在不同密度下应力-能量方程的 a 和 b , 及其符合特定多项式的数学关系式。**结论** 得到了 EPS 材料的应力-能量方程式及材料常数 a 和 b 的变化趋势函数, 由此获得同一衬垫材料在任意密度下的动态缓冲曲线。

关键词: 应力-能量法; 动态缓冲特性曲线; 材料密度; 数学多项式

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)05-0044-04

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.009

Properties of Cushion Packaging Materials Based on Stress-energy Method

CHEN Man-ru, LIU Lan

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

ABSTRACT: The work aims to study the method to obtain the dynamic cushioning characteristic curve of liners of different densities to get the change law of material property, in order to enhance the test efficiency. The dynamic compression tests for EPS of different densities were conducted. Based on the comparison of constants a and b of stress-energy equation under different densities of key materials, the changing curves of material constants under different densities were fitted to analyze the change trend of values a and b under different densities of materials. Through multiple curve fittings of different function types and comparative analysis, the values a and b of stress-energy equation and the specific polynomial mathematical relationship were acquired for the different densities of liner materials. The stress-energy equation and the change trend functions of constants a and b of EPS materials are obtained, from which the dynamic cushioning curve under any density of the same liner can be obtained.

KEY WORDS: stress-energy method; dynamic cushioning characteristic curve; material density; mathematical polynomial

缓冲包装材料传统的缓冲特性曲线测试方法主要是动态压缩实验, 且需对材料进行上百次的冲击才能得到它在一种跌落高度下的缓冲特性曲线, 而应力-能量法的应用可在相同的工作量下得到材料在任意高度和缓冲厚度下的缓冲特性曲线。

Daum 提出了应力-能量法的应用理论^[1]; 张波涛研究了应力-能量法在测定泡沫塑料缓冲曲线中的应用^[2]; 王金梅等通过应力-能量法求取泡沫塑料缓冲曲线时的函数模型^[3]; 史岩等对确定缓冲曲线的应力-能

量法进行了研究^[4]; 张慧等针对应力-能量法的内容研究出直线法测定泡沫塑料的缓冲系数曲线^[5]。应力-能量法也有其局限, 即每组实验只能得到材料在一种密度下的动态缓冲特性曲线, 而不同密度材料的缓冲性能均有差异。若找出不同密度材料特有的性能特征, 并通过具体数据表现出来, 便可通过数据反推出材料在任意密度下的应力-能量方程。

这里用 3 种不同密度的 EPS 进行基于应力-能量法的动态压缩实验, 并得到 3 种不同密度缓冲材料的

收稿日期: 2017-07-22

作者简介: 陈满儒 (1957—), 男, 陕西科技大学教授, 主要研究方向为缓冲包装动力学与物流运输包装。

应力-能量方程，通过对比各自不同密度下应力-能量方程的材料常数 a 值与 b 值的变化趋势，找到与其变化趋势最吻合的函数关系。

1 应力-能量法

应力-能量法的核心思想是得到加速度与缓冲厚度和跌落高度之间的数学关系。动应力-动能量方程：

$$G = \frac{ae^{\frac{bSH}{d}}}{S} \tag{1}$$

式中： G 为加速度； S 为静应力； H 为跌落高度； d 为缓冲厚度^[1]； a 与 b 为材料常数，是材料在一种密度下特有的数值，依据材料性能而变化。

将所需要的缓冲材料厚度和跌落高度数值代入式 (1)，便可快速得到相对应加速度 G 值，然后通过一系列 G 值即可拟合出其动态缓冲曲线。 a 与 b 为应力-能量方程的关键，材料密度不同， a 与 b 就不同，因此需要找到 a 值与 b 值在不同密度缓冲材料下的变化趋势。

2 基于应力-能量法的缓冲材料动态压缩实验

2.1 材料与设备

缓冲材料种类繁多，为使研究更具实用价值，这里选取被广泛使用的 EPS 进行实验研究，EPS 样品密度选取为 13.7, 18.6, 21.5 kg/m³。试验设备为缓冲材料动态压缩试验机，采用 DY-2 冲击试验机，其最大跌落高度为 1200 mm，最大跌落质量为 50 kg。基于应力-能量法制定实验方案，保证每组实验产生相对应的动能量值。实验方案见表 1。

表 1 实验方案制定
Tab.1 Experiment scheme formulation

样品	动能量/ (kJ·m ⁻³)	尺寸/m	跌落 高度/m	跌落 质量/kg
1	25	0.18×0.18×0.05	0.41	10
2	50	0.18×0.18×0.05	0.55	15
3	75	0.16×0.16×0.03	0.45	13
4	100	0.16×0.16×0.03	0.52	15
5	125	0.15×0.15×0.03	0.57	15
6	150	0.15×0.15×0.03	0.57	18
7	175	0.14×0.14×0.03	0.66	16
8	200	0.1×0.1×0.03	0.51	12
9	225	0.1×0.1×0.03	0.46	15

2.2 数据整合处理

通过对 3 组样品进行动态压缩后得到实验数据，

求取能量值对应的平均动应力。3 组材料得到的动能量-动应力结果见表 2，由表 2 可得到多个动应力-动能量的点，采用 Matlab 软件进行指数函数关系的数据拟合，得到动能量与动应力之间的指数函数关系式。数据结果见图 1。

密度为 21.5 kg/m³ 的 EPS 指数拟合曲线中 $R^2=$

表 2 EPS 实验所得平均动应力数据
Tab.2 Experimental data for EPS of the average dynamic stress kPa

动能量/ (kJ·m ⁻³)	密度/(kg·m ⁻³)		
	13.7	18.6	21.5
75	162.28	203.357	212.60
100	239.79	273.131	271.55
125	375.50	399.9	396.52
150	393.86	614.706	553.95
175	449.81	687.827	745.32
200	524.25	929.432	958.07

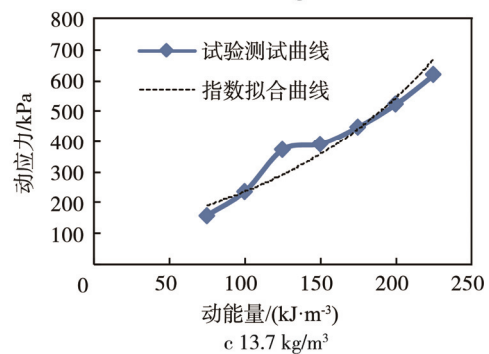
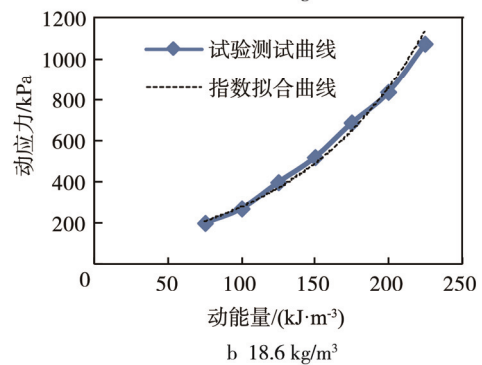
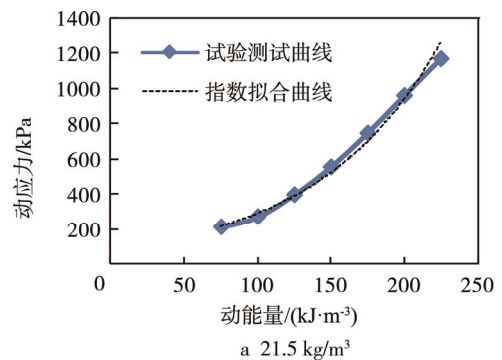


图 1 不同密度的 EPS 动应力-动能量曲线

Fig.1 Dynamic stress-dynamic energy curve for EPS of different density

0.99237, 说明该曲线拟合程度很高。拟合曲线所得指数公式为 $y=88.926e^{0.0118x}$, 可知动应力-动能量公式中的材料常数 $a=88.926$, $b=0.0118$, 因此得到可构建该材料缓冲特性曲线的方程为:

$$G = \frac{88.926e^{0.0118 \frac{SH}{d}}}{S} \quad (2)$$

同理, 密度为 18.6 kg/m^3 的 EPS 指数拟合曲线中 $R^2=0.9915$, 表示拟合程度很高。指数公式为 $y=93.393e^{0.0111x}$, 可知材料常数 $a=93.393$, $b=0.0111$, 则对应的应力-能量方程:

$$G = \frac{93.39e^{0.0111 \frac{SH}{d}}}{S} \quad (3)$$

同理, 密度为 13.7 kg/m^3 的 EPS 指数拟合曲线中 $R^2=0.942$, 表示拟合程度很高。指数公式为 $y=95.813e^{0.0088x}$, 可知材料常数 $a=95.813$, $b=0.0088$, 则对应的应力-能量方程:

$$G = \frac{95.813e^{0.0088 \frac{SH}{d}}}{S} \quad (4)$$

3 实验数据分析

通过对材料常数变化趋势进行线性关系、对数关系、指数关系、多项式关系等函数关系的拟合与匹配, 最终发现拟合结果中拟合度最高的均为多项式函数关系。具体拟合结果见图 2。 $R^2=1$, 说明曲线拟合程度很高。根据多项式拟合曲线结果可得各个不同密度之间的 EPS 材料参数关系分别符合如下多项式函数。

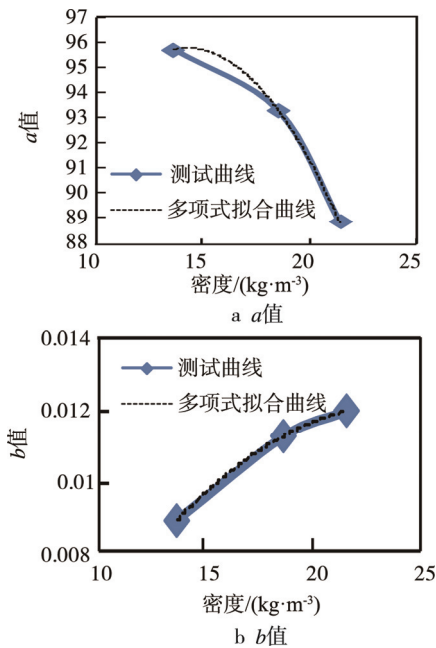


图 2 EPS 材料常数 a 值和 b 值的变化曲线
Fig.2 Change curve of constants a and b for EPS

1) a 值:

$$y=-0.134x^2+3.8321x+68.454, R^2=1 \quad (5)$$

2) b 值:

$$y=-3 \times 10^{-5}x^2+0.0014x-0.0051, R^2=1 \quad (6)$$

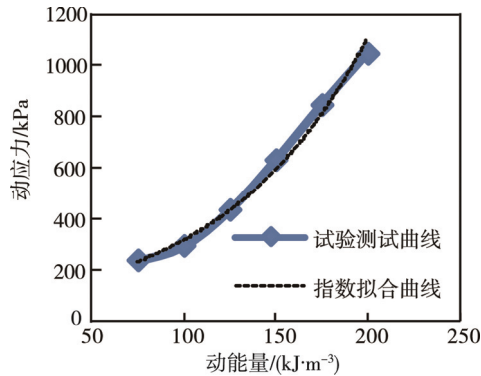
4 实验数据验证

以 17.6 kg/m^3 的 EPS 开展动态压缩实验, 并进行验证, 实验方案的制定与表 1 中 EPS 方案相同。实验数据见表 3。

表 3 实验结果
Tab.3 Experimental results

动能量/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	静应力/ kPa	实测加速 度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	动应 力/kPa	平均动 应力/kPa
75	5	48.32	241.61	238.37
	5.5	43.51	239.32	
	6	40.56	243.36	
	6.5	36.28	235.79	
	7	33.11	231.77	
100	7	44.01	308.09	295.19
	7.5	38.84	291.31	
	8	36.97	295.72	
	8.5	33.19	282.12	
	9	33.19	298.71	
125	8.7	45.92	399.48	436.02
	9.28	42.01	389.89	
	9.86	41.17	405.92	
	10.44	39.45	411.86	
	11.02	51.99	572.95	
150	10.89	50.72	552.35	631.35
	11.57	44.49	514.77	
	12.25	49.10	601.52	
	12.93	59.86	774.03	
	13.61	52.47	714.07	
175	9.28	88.39	820.26	845.60
	9.86	76.00	749.32	
	10.44	72.50	756.94	
	11.02	87.53	964.58	
	11.6	80.77	936.91	
200	10.89	82.08	893.90	1044.82
	11.57	78.62	909.69	
	12.25	81.48	998.11	
	12.93	91.71	1185.81	
	13.61	90.86	1236.62	

数据拟合后, 得到的动应力-动能量曲线见图 3。由拟合结果可知, 17.6 kg/m^3 EPS 曲线中 R^2 为 0.9912, 说明拟合程度很高, 指数公式为 $y=91.318e^{0.0125x}$, 可

图3 17.6 kg/m³的EPS动应力-动能量曲线Fig.3 Dynamic stress-dynamic energy curve for EPS of 17.6 kg/m³

知 $a=91.318$, $b=0.0125$ 。

再根据式(5—6)分别得到其应力-能量方程的 a 与 b 值, 可得 $a=94.39$, $b=0.011$ 。由此得出理论与实验的对应误差在 3%和 10%左右, 相差甚微。实验验证了文中研究方法的便捷性。

5 结语

通过实验与数据分析, 基于常见缓冲材料 EPS 分别在 3 种不同密度下的动态压缩实验数据, 结合应力-能量法进行了完整的实验参数设置、实验方案的实施及实验数据的分析, 最后得到了缓冲材料在不同密度下的应力-能量方程以及动态缓冲曲线。基于实验数据以及分析拟合, 发现各缓冲材料的材料常数与密度之间拟合度最高的数学关系, 满足特定的多项式函数。通过以密度为自变量的多项式关系, 获得该种材料在任意密度下的材料常数值, 推算出其应力-能量方程, 容易得到动态缓冲曲线。最后通过实验证明了结果的合理性。受限于客观条件, 文中所选材料密度的区间较小, 不能精确体现出材料性能, 这也是该研究需要再提升改进的地方。总体来说, 这里为应力-能量法的应用提出了新的理念与方式, 在应力-能量法的基础上, 可加倍减少资源与时间上的耗费。该方法在运输包装领域具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] DAUM M. A Simplified Process For Determining Cushion Curves: The Stress-energy Method[C]// Palo Alto: Hewlett-Packard Company, 1999.
- [2] 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—60.
ZHANG Bo-tao. Application of the Stress-energy Method in Determining Cushion Curve of Foam Material[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 59—60.
- [3] 王金梅, 刘乘. 应力-能量法求取泡沫塑料缓冲曲线时函数模型的研究[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 79—82.
WANG Jin-mei, LIU Cheng. Function Models of the stress-energy Method in Determining Cushion Curves of Foam Materials[J]. Packaging engineering, 2014, 35(5): 79—82.
- [4] 史岩, 李光. 确定缓冲曲线的应力-能量法研究[J]. 包装学报, 2014, 6(3): 35—40.
SHI Yan, LI Guang. Research on Stress-energy Method for Determining Cushioning Curve[J]. Journal of Packaging, 2014, 6(3): 35—40.
- [5] 张慧, 谢宇坤, 王军. 直线法测定泡沫塑料缓冲系数曲线[J]. 包装工程, 2011, 32(3): 36—38.
ZHANG Hui, XIE Yu-kun, WANG Jun. Determination of Cushioning Performance of Foam Using Improved Stress-energy Method[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 36—38.
- [6] 彭国勋, 郭彦峰. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012.
PENG Guo-xun, GUO Yan-feng. Logistics and Transport Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012.
- [7] 山静民, 吴功平, 张丽芳. 包装测试技术[M]. 北京: 印刷工业出版社, 1999.
SHAN Jing-min, WU Gong-ping, ZHANG Li-fang. Packaging Testing Technology[M]. Beijing: Printing Industry Press, 1999.
- [8] GB/T 8167—2008, 包装用缓冲材料动态压缩实验方法[S].
GB/T 8167—2008, Dynamic Buffer Material Compression Experiment Method[S].
- [9] ASTM D1596, 包装材料的动态冲击缓冲特性的标准测试方法[S].
ASTM D1596, Standard Test Method for Dynamic Shock Cushioning Properties of Packaging Materials[S].
- [10] 王建清, 杨仲林, 孙荣芳. 包装材料学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011.
WANG Jian-qing, YANG Zhong-lin, SUN Rong-fang. Packaging Materials Science[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2011.
- [11] 山静民, 刘乘, 彭国勋, 等. 缓冲材料冲击试验机的数据采集和处理系统[J]. 中国包装, 1999(3): 98—99.
SHAN Jing-min, LIU Cheng, PENG Guo-xun, et al. Data Acquisition and Processing System for Buffer Material Impact Test Machine[J]. Chinese Packaging, 1999(3): 98—99.
- [12] 丁毅, 陈立民, 苏杰. 基于能量法测试包装材料缓冲曲线的探讨[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(6): 66—70.
DING Yi, CHEN Li-min, SU Jie. An Approach to the Measurement of Cushioning Curve of Packaging Materials Based on Energy Method[J]. Packaging and Food Machinery, 2011, 29(6): 66—70.
- [13] 史航标, 李铁军, 周欣欣. 浅析能量法在抗震设计中的应用[J]. 城市建设理论研究, 2012(14): 55—58.
SHI Hang-biao, LI Tie-jun, ZHOU Xin-xin. An Analysis of the Application of Energy Method in Seismic Design[J]. Urban Construction Theory Research, 2012(14): 55—58.
- [14] 吴丽娟, 姜帅. 三种常见缓冲材料的动态压缩缓冲性能[J]. 中国水运, 2006, 11(6): 62—65.
WU Li-juan, JIANG Shuai. Dynamic Cushioning Properties of Three Kinds of Common Cushioning Materials[J]. China Water Transport, 2006, 11(6): 62—65.
- [15] GLEN P. A Performance of Expanded Polymer Cushion Materials at Less than One Inch Thick[D]. South Carolina: Clemson University, 2010.
- [16] 陈淑荣. 发泡材料缓冲性能表征方法的研究进展[J]. 印刷质量与标准化, 2013(1): 25—27.
CHEN Shu-rong. Research Progress on the Characterization Method of the Cushioning Properties of Foamed Materials[J]. Printing Quality and Standardization, 2013(1): 25—27.