

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2013.04.007

尺度效应对发泡聚乙烯静态缓冲性能的影响

田 芑, 滑广军

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 发泡聚乙烯等闭孔式缓冲材料通常通过裁切、黏合的加工方法制作成缓冲结构, 裁切对气泡的破坏会影响缓冲结构的缓冲性能。针对该问题设计了2组试验, 分析了裁切破坏式和刺穿破坏式2种气泡破坏方式对材料缓冲性能的影响, 并与经典试验方法得到的缓冲性能曲线进行了对比分析。研究表明: 裁切对发泡聚乙烯的刚度存在明显的尺度效应; 2种气泡破坏方式都会对发泡聚乙烯的缓冲性能产生影响; 试验验证显示, 随着裁切次数的增加, 4种方案的衬垫厚度差别较小, 衬垫面积及材料用量相差较大, a、b方案的衬垫面积及材料用量较相近, c、d方案的衬垫面积及材料用量相对于a、b方案有较明显增加。

关键词: 发泡聚乙烯; 尺度效应; 静态缓冲性能

中图分类号: TQ325.1+2

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2013)04-0030-04

Impact of Scale Effect on Cushioning Properties of Expanded Polyethylene

Tian Peng, Hua Guangjun

(School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Closed-cell cushioning material, as expanded polyethylene, is usually shaped into cushioning structure by the processing method of cutting and adhesion. The damage to bubble by cutting would affect the cushioning properties of the material. Furthermore, the damage would affect the cushioning structure properties. A series of experiments are designed to analyze the influence of two different bubble damage ways (cutting damage type, piercing damage type) on the material cushioning properties, and contrasted with the cushioning properties curve result from classical experiment method. The results show that scale effect obviously exists in the material's rigidity in the cutting damage type. The two kinds of bubble damage ways have influence on the cushioning properties of the expanded polyethylene. With the increase of cutting frequency, the four schemes demonstrate big differences in areas and volumes. The data of a and b schemes are similar, the data of c and d are significantly increased than other schemes.

Key words: expanded polyethylene; scale effect; static cushioning properties

1 研究概述

在许多学科领域, 尺度效应 (scale effect) 都是研究的热点^[1-6]。按照材料缓冲性能的试验标准, 缓冲材料的性能评价一般是利用一定标准尺寸规格的

试样测试得到的, 而缓冲材料在加工成缓冲结构时, 起缓冲作用的尺度与标准试样的尺度存在一定差异。发泡聚乙烯 (expandable polyethylene, EPE) 等闭孔式材料, 其缓冲性能在很大程度上得益于其闭孔结构, 而其加工成型过程会破坏这些材料的闭孔结构。

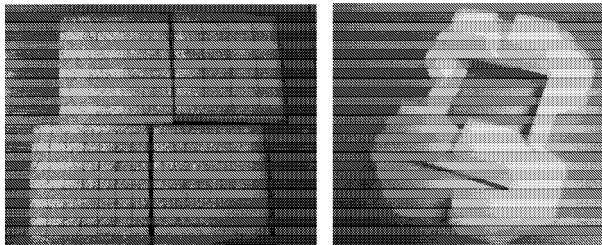
收稿日期: 2013-03-18

作者简介: 田 芑 (1989-), 女, 湖南龙山人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为物流运输包装,

E-mail: tiansisuo@qq.com

因此,将尺度效应概念引入缓冲材料的力学性能分析,能更准确地研究因加工行为造成材料破坏而引起的尺度效应对材料缓冲力学性能的影响。

发泡聚乙烯又称珍珠棉,是一种低密度、闭孔结构的新型环保包装材料,由低密度聚乙烯经物理发泡而成,广泛应用于电子、电器产品的缓冲包装。缓冲包装结构的形状一般比较复杂,EPE缓冲材料成型工艺独特,不能像发泡聚苯乙烯那样进行模塑,其成型方式主要为板材模切拼接成型^[7-8],而模切会对EPE细观结构造成破坏。按照GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》,缓冲试样必须是符合标准的规则直方体,缓冲试样尺寸为100 mm×100 mm或200 mm×200 mm^[9],如图1a所示;而EPE缓冲结构则往往是比较复杂的不规则形状,如图1b所示。



a) 标准的缓冲衬垫试样 b) 实际使用的缓冲衬垫结构

图1 EPE缓冲衬垫结构

Fig. 1 The samples of EPE cushioning

本文通过试验,分析气泡结构破坏和稳定性变化对EPE缓冲性能的影响,并讨论这两种因素引起的尺度效应对材料缓冲力学性能的影响。

2 试验

2.1 材料与设备

试验样品为29.72 kg/m³的发泡聚乙烯,市售;试样尺寸为100 mm×100 mm×25 mm。

微机控制电子万能试验机,CMT6104型,精度为0.5级,深圳市世纪天源仪器有限公司;游标卡尺,精度为0.02 mm,I型,上海旦鼎国际贸易有限公司;刻度尺、小刀、刚性平板、细针,均为市售。

2.2 力-变形测试

参照GB/T 8168—2008,选择A试验方法^[9],设计2组试验。试验环境设置为温度20℃,湿度60%。

试验1:将试样分为a,b,c,d 4组,每组4个试样,共16个。对4组试样分别采取如图2所示的裁切方式进行裁切(单位为mm),破坏样品的整体稳定性,分析稳定性变化及气泡破坏对EPE缓冲性能的影响。

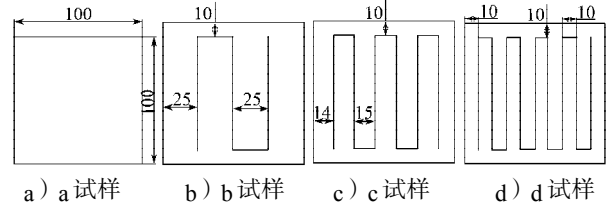


图2 试验1试样裁切方案示意图

Fig. 2 The schematic diagram of cutting scheme in experiment 1

试验2:取与试验1同样材质的样品,共4个,将100 mm×100 mm平面平均划分为100格,每小格用细针扎破EPE中的气泡5次,破坏样品中的气泡,不破坏其整体稳定性,分析气泡结构的破坏对其缓冲性能的影响,并与试验1对比。

参照参考文献[10]中的温湿度调节处理方法,对试样做预处理,预处理温度为(23±2)℃,湿度为(50±5)%,处理时间为48 h。

采用微机控制电子万能试验机,以10 mm/min的速度对试样进行加载,采集力-变形数据。

3 结果与讨论

3.1 应力-应变曲线

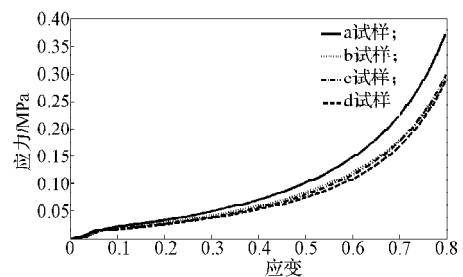
参照GB 8166—87《缓冲包装设计方法》^[11]中的数据处理方式,对测试得到的力-变形数据按照式(1)、(2)计算,得到应力-应变数据,并对每组应力-应变数据求平均值。

$$\sigma = F/s, \quad (1)$$

$$\varepsilon = x/d. \quad (2)$$

式中: σ 为应力,MPa; ε 为应变; F 为载荷,N; s 为面积; x 为位移,mm; d 为试样厚度,mm。

利用Matlab软件处理数据生成曲线,各组的等效应力-应变曲线如图3a所示。由图3a分析可知,随着裁切次数的增加,试样刚度呈减小趋势。采取与试验1相同的方法,对试验2测试数据进行处理,其应力-应变曲线如图3b所示。由图3b分析可知,EPE试样中的气泡被破坏后,与试验1相比,在同等形变下,刚度明显减小。



a) 试验1

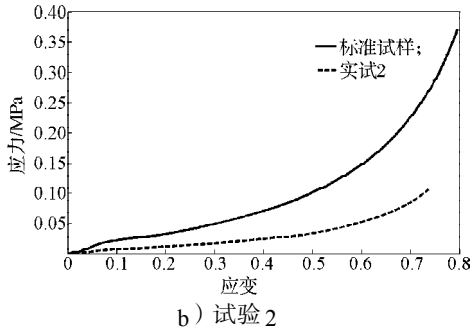


图3 2组实验应力-应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curves diagram of experiments

3.2 静态缓冲系数-最大应力曲线

根据所得应力-应变数据,参照GB 8166-87中的数据处理方式,将应力-应变曲线下的面积分割为若干区域,利用式(3)~(5)进行处理,可得到如图4所示的静态缓冲系数-最大应力曲线。

$$\Delta e_i = \frac{1}{2}(\sigma_i + \sigma_{i-1})(\sigma_i - \sigma_{i-1}), \quad (3)$$

$$e_i = \sum_{k=1}^i \Delta e_k, \quad (4)$$

$$C_i = \sigma_i / e_i \quad (5)$$

式中: e 为达到应力 σ 时材料的单位变形能, $N \cdot m$; C 为缓冲系数; $i=1,2,\dots,n, k=1,2,\dots,i$ 。

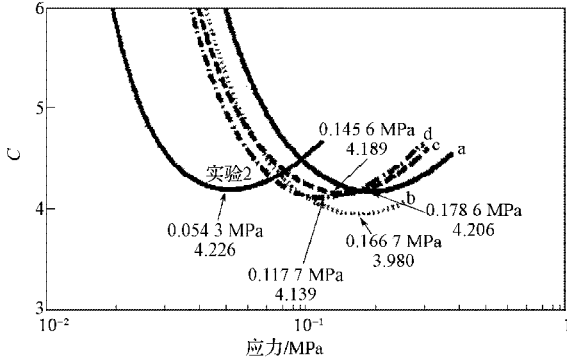


图4 2组试验静态缓冲系数-最大应力曲线

Fig. 4 The static $C-\sigma_m$ curves diagram of experiments

由图4可知,2组试验对应的最小缓冲系数差别不大,而各最小缓冲系数对应的最大应力差别较大。试验1中a, b, c, d 4个试样对应的最低点分别为(0.178 6 MPa, 4.206), (0.166 7 MPa, 3.980), (0.145 6 MPa, 4.189), (0.117 7 MPa, 4.139); 试验2曲线对应的最低点为(0.054 3 MPa, 4.226)。试样a~d的 σ 值逐次减小,说明随着裁切次数的增多, EPE样品静态缓冲曲线的最大应力逐渐减小。计算b, c, d相对a的 σ 值变化率,分别约为6.1%, 18.48%, 34.1%。

对比2组试验,试验1的尺度被改变,其稳定性降低,尺度的减小对材料的缓冲性能影响不大;试验2的尺度没有遭到破坏,没有破坏试样的稳定性

能,气泡破坏对材料的缓冲性能影响较大。

4 试验验证

选取某产品进行试验验证。该产品质量为5 kg,许用脆值为40,等效跌落高度为50 cm。分别用试验1中4种方案的缓冲特性数据进行计算和比较。由于试验2中的最小缓冲系数几乎为0,故不进行验证。利用静态缓冲系数曲线进行设计时,本文选取曲线的最低点 C_{min} 值和 σ_{min} 值进行计算。通过公式(6)(7)得到缓冲垫面积 s 和缓冲垫厚度 d ,比较各方案的缓冲材料用量 V ,并采用式(8)进行稳定性验证^[11]。

$$s = mgG/\sigma_{min}, \quad (6)$$

$$d = C_{min}h/G, \quad (7)$$

$$s_{min} > (1.33d)^2. \quad (8)$$

式中: s 为缓冲垫面积, cm^2 ; m 为质量, kg ; G 为脆值; h 为跌落高度, cm 。

通过对试验1中4种方案的比较,相对于a方案, b, c, d方案的衬垫面积与最小缓冲系数对应的 σ_{min} 相关,衬垫面积之间的差别主要是由 σ_{min} 决定的,而衬垫厚度是由缓冲系数 C 决定的。

表1为试验1中4种方案的缓冲衬面积、厚度和材料用量的对比。

表1 试验1中4种方案衬垫面积、厚度和材料用量对比
Table 1 The four schemes comparison of cushioning areas, thickness, volumes

方案	s/cm^2	d/cm	V/cm^3
a	111.98	5.032 5	588.75
b	119.26	4.975 0	593.32
c	137.36	5.247 5	719.27
d	169.92	5.173 8	879.14

由表1可看出:4种方案的衬垫厚度差别较小;4种方案的衬垫面积和材料用量相差较大,a, b方案的衬垫面积及材料用量较相近,c, d方案的衬垫面积及材料用量相对于a, b方案有较明显增加;相对于a方案,b, c, d方案材料用量之间的差距分别为0.78%, 22.16%, 49.32%。

通过计算,试验2所需衬垫面积、厚度和材料用量分别为368.32 cm^2 , 5.282 5 cm 和1 944.60 cm^3 。与试验1相比,试验2的衬垫面积和材料用量明显增加,从而增加缓冲包装成本。

在设计过程中,发泡聚乙烯衬垫选取的是a方案的曲线和数据,但由于实际生产中发泡聚乙烯衬垫多采用板材模切拼接成型,根据上述比较,设计和实际使用中存在差异,越为复杂的衬垫结构,与试验中c, d方案的情况越为接近,实际生产与设计的差

异性也就越大。因此,在设计缓冲衬垫时,可根据衬垫结构的复杂性,选取更为接近实际情况的缓冲特性曲线。

5 结论

1) 随着裁切次数的增多,材料的刚度逐渐减小,说明裁切对 EPE 的刚度存在明显的尺度效应。

2) 气泡破坏和稳定性对材料的刚度都有明显影响,稳定性对材料缓冲性能的影响较小,而气泡破坏对材料缓冲性能的影响较大。

3) 试验曲线采用缓冲衬垫设计进行验证。试验 2 的缓冲包装成本比试验 1 要高。比较试验 1 中的 4 种剪切方案中衬垫面积、衬垫厚度和材料用量的大小,结果表明,随着裁切次数的增加,4 种方案的衬垫厚度差别较小,衬垫面积及材料用量相差较大,a, b 方案的衬垫面积及材料用量较相近,c, d 方案的衬垫面积及材料用量相对于 a, b 方案有较明显增加。

参考文献:

- [1] Zdenek Bazant, Chen Er-Ping. 结构破坏的尺度律[J]. 力学进展, 1999, 29(3): 383-433.
Zdenek Bazant, Chen Er-Ping. Scaling of Structural Failure [J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(3): 383-433.
- [2] 鲍光润. 尺度效应研究现状概述[C]//安徽省科协年机械工程分年会论文集. 合肥: 安徽省科学技术协会, 2008: 74.
Bao Guangrun. The Summary of Scale Effect Research Situation[C]//Symposium of Mechanical Engineering Annual Meeting, Anhui Province Association of Science and Technology Conference. Heifei: Anhui Province Association Science and Technology, 2008: 74.
- [3] 孙士平, 张卫红, 邱克鹏, 等. 蜂窝夹芯圆环的拓扑优化设计及尺度效应研究[J]. 力学学报, 2007, 39(6): 788-795.
Sun Shiping, Zhang Weihong, Qiu Kepeng, et al. Integrated Topology Optimization and Scale Effect Analysis of Cyclic Symmetry Sandwich Structures[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(6): 788-795.
- [4] Shen Yu, Yu Huping, Ruan Xueyu. Discussion and Prediction on Decreasing Flow Stress Scale Effect[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(1): 132-136.
- [5] 刘书田, 陈晓霞, 常崇义. 复合材料弹性性能尺度效应[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(2): 200-205.
Liu Shutian, Chen Xiaoxia, Chang Chongyi. Size Effect on Elastic Constants of Composite Materials[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(2): 200-205.
- [6] Zdeněk P Bazant, Yong Zhou, Goangseup Zi, et al. Size Effect and Asymptotic Matching Analysis of Fracture of Closed-Cell Polymeric Foam[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(1): 7197-7217.
- [7] 齐贵亮. 泡沫塑料成型新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 5.
Qi Guiliang. The New Technology of Foam Plastic Shaping [M]. Beijing: Machine Communication Press, 2010: 5.
- [8] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2006: 116.
Peng Guoxun. The Design of Logistics Transport Packaging [M]. Beijing: Graphic Communication Press, 2006: 116.
- [9] 国家标准化管理委员会. GB/T 8168—2008 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 2-3.
National Standardization Management Committee. GB/T 8168—2008 Testing Method of Static Compression for Package Cushioning Materials[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 2-3.
- [10] 国家标准化管理委员会. GB/T 4857.2—2005 包装运输包装件基本试验: 第2部分: 温湿度调节处理[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-2.
National Standardization Management Committee. GB/T 4857.2—2005 Testing Method of Static Compression for Package Cushioning Materials[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-2.
- [11] 国家标准局. GB 8166—87 缓冲包装设计方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987: 13-14.
National Standardization Department. GB 8166—87 Package Cushioning Design Method[S]. Beijing: Standards Press of China, 1987: 13-14.

(责任编辑: 徐海燕)