

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2016.01.006

密度梯度变化对多层发泡聚乙烯力学性能的影响

鄂玉萍^{1,2}, 李莹¹

(1. 浙江理工大学 材料与纺织学院, 浙江 杭州 310018;

2. 浙江理工大学 纺织纤维材料与加工技术国家地方联合工程实验室, 浙江 杭州 310018)

摘要: 基于准静态压缩试验, 对恒密度型(UD)、对称梯度型(CSGD)和非对称梯度型(AGD)3类多层发泡聚乙烯的力学性能进行研究。结果表明: CSGD型多层发泡聚乙烯和AGD型多层发泡聚乙烯的压缩力学性能都优于常用的UD型多层发泡聚乙烯; 对CSGD型多层发泡聚乙烯而言, 中心层发泡聚乙烯的密度变化对整体的力学性能无显著影响, 但上述性能会随上下表皮层发泡聚乙烯的密度增加而显著下降; 对于AGD型多层发泡聚乙烯, 密度分布变化对整体性能无明显影响。上述结果表明, 可以通过调整CSGD型多层发泡聚乙烯各层的密度, 特别是上下表皮层的密度, 以获取所期望的压缩性能, 因此可以使发泡聚乙烯缓冲包装设计更加灵活。

关键词: 发泡聚乙烯; 对称型梯度密度; 能量吸收

中图分类号: TB34; TB484.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2016)01-0030-06

Impact of Density Gradient Change on Mechanical Properties of Multilayer EPE Foam

E Yuping^{1,2}, LI Ying¹

(1. College of Materials and Textiles, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. National & Local United Engineering Laboratory of Textile Fiber Materials and Processing Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Compressive properties and energy absorption abilities of centrally symmetric grade density (CSGD), asymmetric grade density (AGD) and uniform density (UD) were evaluated by quasi-static compression. It was observed that the compressive capacities of both CSGD type and AGD type EPE foam blocks outperformed its uniform counterpart; for CSGD type EPE foam blocks, density variety of central layer had no discernible effect on the compressive properties and energy absorption abilities, but these properties would decrease significantly with the increase in the densities of the upper and bottom surface; while for AGD type EPE foam blocks, different density distribution of each layer only had marginal influence on its compressive behaviors. These results illustrated a good prospect that desired compressive strength could be obtained by adjusting the density of each layer of CSGD type EPE foam block, thus providing more flexible cushion packaging by using EPE foam.

Key words: EPE foam; centrally symmetric grade density; energy absorption property

收稿日期: 2015-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51303160), 浙江理工大学521人才培养计划基金资助项目(11110132521504), 产品包装与物流广东省普通高校重点实验室开放基金资助项目(1101712-N), 浙江省高校重中之重学科优秀青年人才培养基金资助项目(2014YXQN04)

作者简介: 鄂玉萍(1982-), 女, 河南南阳人, 浙江理工大学讲师, 博士, 主要从事环保缓冲包装材料性能方面的教学与研究, E-mail: packkeyp@126.com

0 引言

发泡聚乙烯 (extruded polyethylene, EPE) 是一种新型缓冲包装材料, 它以低密度聚乙烯树脂为主要原料, 经加热塑化后, 加入丁烷发泡剂, 挤出发泡成型而制得。因其密度低, 易加工, 具优良的抗静电性能和缓冲性能, 故被广泛地应用于小型家电、精密仪器、工艺品、酒类等贵重和易碎品的缓冲包装中^[1]。许多学者对 EPE 的力学行为和缓冲性能进行了试验和理论研究^[2-7], 还有一些学者研究了环境温度^[8-9]、蠕变^[10]、尺度效应^[11]等对发泡聚乙烯性能的影响。

由若干个单层发泡聚乙烯逐层热熔复合制得的多层发泡聚乙烯, 根据各单层发泡聚乙烯的密度分布情况可分为3类, 即恒密度型 (uniform density, UD) 多层发泡聚乙烯、对称梯度型 (centrally symmetric grade density, CSGD) 多层发泡聚乙烯和非对称梯度型 (asymmetric grade density, AGD) 多层发泡聚乙烯。多层 EPE 成型工艺较为独特, 常见的是采用挤出法挤出的片材经多层熔接而制成一定厚度的板材, 然后截成小块, 粘接成设计要求的各种结构^[12]。普遍的生产法是将若干层密度和厚度完全相同的单层发泡聚乙烯材料粘接在一起, 现有研究基本上是基于这种密度恒定的多层发泡聚乙烯展开的。然而, 如果将若干层厚度相同而密度呈现梯度变化的发泡聚乙烯粘接在一起形成一定厚度的发泡聚乙烯结构件, 其力学性能与恒密度多层发泡聚乙烯是否存在差异, 目前还缺少相关数据。因此, 本文拟通过准静态压缩试验, 对恒密度、对称梯度密度和非对称梯度密度3类多层发泡聚乙烯的力学性能进行研究, 以期多层发泡聚乙烯的应用提供一定的参考依据。

1 材料与试验

1.1 试验材料的制备与选取

单层发泡聚乙烯, 发泡倍率分别为15, 20, 25, 30, 35倍, 对应的密度分别为0.061, 0.046, 0.037, 0.031, 0.026 g/cm³, 由新航 (苏州) 发泡塑料有限公司提供。

多层发泡聚乙烯, 由5个厚度均为5 mm的单层发泡聚乙烯逐层热熔复合而成, 所选用的热熔复合剂为乙烯-醋酸乙烯共聚物 (ethylene-vinyl acetate copolymer, EVA)。

根据用于复合的各单层发泡聚乙烯的密度是否相同及其密度的分布规律, 可制得3种类型的试样:

1) 各单层发泡聚乙烯密度均相同, 得到目前常用的恒密度型多层发泡聚乙烯 (UD, 其中的 UD-25 结构示意图 1);

2) 5个单层发泡聚乙烯的密度分布从上表皮层到下表皮层, 呈现出中心对称分布趋势, 则形成的多层发泡聚乙烯定义为对称梯度型多层发泡聚乙烯 (CSGD, 其中的 CSGD-15/25/35 结构示意图 2);

3) 5个单层发泡聚乙烯的密度从上表皮层到下表皮层随机分布, 形成的多层发泡聚乙烯称为非对称梯度型多层发泡聚乙烯。本试验中选取逐层递增 (AGD-I, 其结构示意图 3a) 和随机分布 (AGD-R, 其中的 AGD-R2 结构示意图 3b) 两种为非对称梯度多层发泡聚乙烯中的密度研究对象。

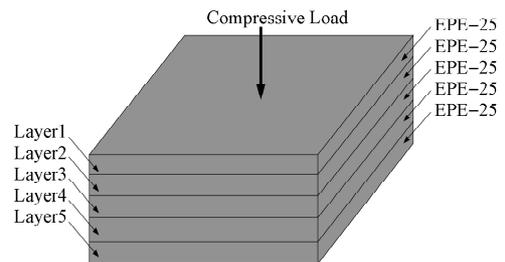


图1 恒密度型多层 EPE 试样 (UD-25) 结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of uniform density specimen (UD-25)

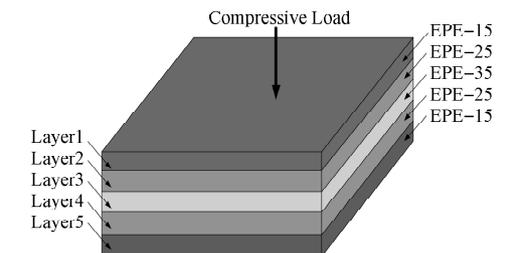
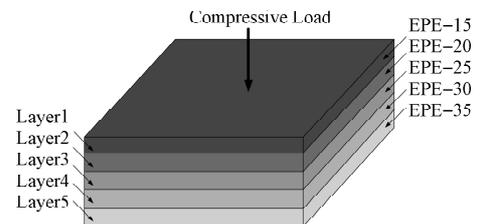
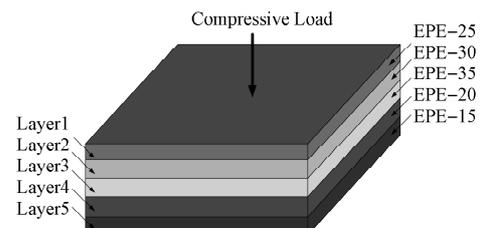


图2 对称梯度型多层 EPE 试样 (CSGD-15/25/35) 结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of centrally symmetric grade density specimen (CSGD-15/25/35)



a) AGD-I



b) AGD-R2

图3 非对称梯度型多层 EPE 试样结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of asymmetric grade density specimen

试验用试样原材料裁切尺寸均为60 mm × 60 mm × 5 mm, 各类型试样的主要参数见表1。

表1 试样参数

Table 1 Parameters of specimens

试样类型	试样号	单层材料	层号	发泡倍率	密度 / (g · cm ⁻³)
恒密度型	UD-15	EPE-15	1	15	0.061
		EPE-15	2	15	0.061
		EPE-15	3	15	0.061
		EPE-15	4	15	0.061
		EPE-15	5	15	0.061
	UD-25	EPE-25	1	25	0.037
		EPE-25	2	25	0.037
		EPE-25	3	25	0.037
		EPE-25	4	25	0.037
		EPE-25	5	25	0.037
	UD-30	EPE-30	1	30	0.031
		EPE-30	2	30	0.031
		EPE-30	3	30	0.031
		EPE-30	4	30	0.031
		EPE-30	5	30	0.031
UD-35	EPE-35	1	35	0.026	
	EPE-35	2	35	0.026	
	EPE-35	3	35	0.026	
	EPE-35	4	35	0.026	
	EPE-35	5	35	0.026	
对称梯度型	CSGD-15/25/35	EPE-15	1	15	0.061
		EPE-25	2	25	0.037
		EPE-35	3	35	0.026
		EPE-25	4	25	0.037
		EPE-15	5	15	0.061
	CSGD-20/25/35	EPE-20	1	20	0.046
		EPE-25	2	25	0.037
		EPE-35	3	35	0.026
		EPE-25	4	25	0.037
		EPE-20	5	20	0.046
	CSGD-15/25/20	EPE-15	1	15	0.061
		EPE-25	2	25	0.037
		EPE-20	3	20	0.046
		EPE-25	4	25	0.037
		EPE-15	5	15	0.061
非对称梯度型	AGD-I	EPE-15	1	15	0.061
		EPE-20	2	20	0.046
		EPE-25	3	25	0.037
		EPE-30	4	30	0.031
		EPE-35	5	35	0.026
	AGD-R1	EPE-35	1	35	0.026
		EPE-30	2	30	0.031
		EPE-20	3	20	0.046
		EPE-15	4	15	0.061
		EPE-25	5	25	0.037
	AGD-R2	EPE-25	1	25	0.037
		EPE-30	2	30	0.031
		EPE-35	3	35	0.026
		EPE-20	4	20	0.046
		EPE-15	5	15	0.061

各试样的主要区别是用于层合的各单层发泡聚乙烯密度的分布情况(用发泡倍率来表示)。其中, UD-25表示由5层发泡倍率均为25倍, 密度均为0.037 g/cm³的单层发泡聚乙烯逐层热熔复合制得的恒密度型多层发泡聚乙烯(其结构见图1); CSGD-15/25/35表示用于层合的5个单层发泡聚乙烯的发泡倍率沿中心层(发泡倍率为35倍, 密度为0.026 g/cm³)对称分布, 复合在中心层发泡聚乙烯上、下表面的两层发泡聚乙烯的发泡倍率均为25倍(密度为0.037 g/cm³), 位于上、下表皮层的两层发泡聚乙烯的发泡倍率均为15倍(密度为0.061 g/cm³), 其结构如图2所示。AGD-I表示用于层合的5个单层发泡聚乙烯的发泡倍率从上至下呈逐层递增的趋势, 上表皮层、上层、中心层、下层、下表皮层发泡聚乙烯的发泡倍率依次为15倍(密度为0.061 g/cm³)、20倍(密度为0.046 g/cm³)、25倍(密度为0.037 g/cm³)、30倍(密度为0.031 g/cm³)和35倍(密度为0.026 g/cm³), 如图3a所示; AGD-R2表示用于层合的5个单层发泡聚乙烯的发泡倍率(密度)随机分布, 其中AGD-R2表示上表皮层、上层、中心层、下层、下表皮层发泡聚乙烯的发泡倍率依次为25倍(密度为0.037 g/cm³)、30倍(密度为0.031 g/cm³)、35倍(密度为0.026 g/cm³)、20倍(密度为0.046 g/cm³)以及15倍(密度为0.061 g/cm³), 如图3b所示。

1.2 试验设备

恒温恒湿箱, GDJS-225型, 中亚试验设备有限公司; 万能材料试验机, RGL-20A型, 深圳市瑞格尔仪器有限公司。

1.3 性能测试

试验前, 将所有备用试样均按照GB/T 4857.2—2005《包装运输包装件温湿度调解处理》的要求, 在温度为23℃, 相对湿度为50%的环境条件下预处理24 h。然后将预处理平衡之后的试样, 参照GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》要求进行测试, 试样尺寸规格为60 mm × 60 mm × 25 mm, 压缩速率为(12 ± 3) mm/min, 每次压缩试验重复5次。记录每次试验的变形量和载荷数据, 并且利用MATLAB[®]软件[Version 7.1 (R14), The Math Works, Inc]将其转化为应力-应变曲线, 5次有效重复试验所得的应力-应变数据进行平均处理后, 用于分析多层发泡聚乙烯的力学性能和能量吸收性能。

2 结果与讨论

2.1 3类多层发泡聚乙烯的力学性能对比

试验所得对称梯度型多层发泡聚乙烯(CSGD-

15/25/35)与恒密度型多层发泡聚乙烯(UD-15、UD-25、UD-35)的应力-应变曲线如图4a所示,非对称梯度型多层发泡聚乙烯AGD-I与上述3种恒密度型多层发泡聚乙烯(UD-15、UD-25、UD-35)的应力-应变曲线如图4b所示。

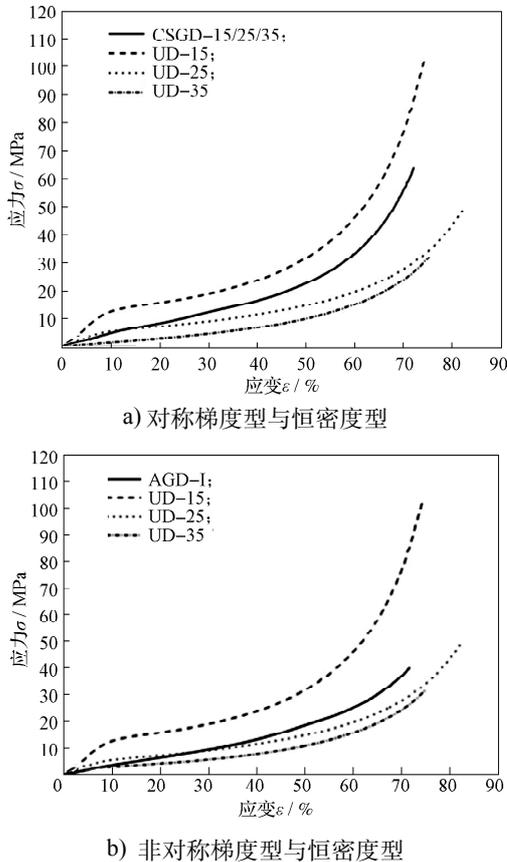


图4 各类型多层发泡聚乙烯的应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves of different kinds of density graded EPE foams

由图4可知,无论是对称梯度型、非对称梯度型还是恒密度型多层发泡聚乙烯试样,其应力-应变曲线的形状基本一致,均呈现为由弹性变形、塑性变形和密实化3个阶段组成的正切型应力-应变曲线。塑性变形区域由于泡孔的连续塑性变形,在应力-应变曲线上形成一段逐渐上升的平台阶段,随着大多数泡孔被压实,发泡材料逐渐密实化,在很小的应变范围内,应力急剧上升,通常将平台阶段与密实化阶段交接处对应的应变称为密实化应变。对于恒密度型多层发泡聚乙烯来说,应力平台随着发泡倍率的增加而减小,密实化应变则随着发泡倍率的增加而增加。

在相同的加载条件下,对称梯度型多层发泡聚乙烯CSGD-15/25/35和非对称梯度型多层发泡聚乙烯AGD-I的应力平台均高于试样UD-35和UD-25的应力平台,而均低于试样UD-15的应力平台。

结合图4a和图4b,以应变为40%为例,对称梯度型多层发泡聚乙烯CSGD-15/25/35的平台应力相比于UD-35和UD-25的平台应力,分别提升了58.42%和30.25%,而相比UD-15的平台应力则降低44.86%;与此类似,非对称梯度型多层发泡聚乙烯AGD-I的平台应力相比于UD-35和UD-25的平台应力,分别提升了43%和4.31%,而相比UD-15的平台应力,则降低了98.6%。因此,多层发泡聚乙烯的密度梯度分布会影响材料的力学性能,无论是对称梯度型还是非对称梯度型多层发泡聚乙烯的压缩力学性能,相比目前常用的恒密度型多层发泡聚乙烯均有一定程度的提升,特别是比由若干个发泡倍率较高、密度较小的单层发泡聚乙烯复合而成的多层发泡材料的压缩性能有较大程度的提高。

对比图4a中CSGD-15/25/35的应力-应变曲线和图4b中AGD-I的应力-应变曲线可知,对称梯度型多层发泡聚乙烯的平台应力略高于非对称梯度型多层发泡聚乙烯,因此可以通过合理安排表层发泡材料和芯层发泡材料的密度,制成对称梯度型多层发泡聚乙烯,以期在获得较高的压缩强度和承载性能的情况下,尽可能节省材料用量,降低制品成本。

对比图4a和图4b还可以发现,在相同加载条件下,恒密度型多层发泡聚乙烯的应力-应变曲线有较为明显的塑性屈服阶段,而对称梯度型和非对称梯度型多层发泡聚乙烯的应力-应变曲线则不够明显,屈服与强化阶段基本合为一体,应力-应变曲线表现为连续递增的特点。

2.2 密度梯度变化对多层发泡聚乙烯力学性能的影响

不同密度梯度变化的对称梯度型多层发泡聚乙烯CSGD-15/25/35,CSGD-20/25/35,CSGD-15/25/20的应力-应变曲线如图5a所示。对比CSGD-15/25/35与CSGD-20/25/35两组试样,可知其上、下表皮层的单层发泡聚乙烯的密度不同,而其它各层密度均相同。由图5a可以观察到CSGD-15/25/35的应力-应变曲线明显高于CSGD-20/25/35,以应变为40%时为例,CSGD-15/25/35的应力比CSGD-20/25/35的应力提升了34.18%,这一结果说明,上、下表皮层的单层发泡聚乙烯的发泡倍率(密度)显著影响对称梯度型多层发泡聚乙烯的力学性能;随着上、下表皮层的发泡倍率增加(对应的密度减少),所制得的对称梯度型多层发泡聚乙烯的压缩力学性能趋于降低;而对比芯层单层发泡聚乙烯密度不同而其他各层密度均相同的CSGD-15/25/35与CSGD-15/25/20两组试样,可以观察到两条应力-应变曲线比较接近,以应变40%时

为例,CSGD-15/25/35的压缩应力比CSGD-15/25/20的应力仅提升9.45%,说明芯层的单层发泡聚乙烯的发泡倍率(密度)对整体多层发泡聚乙烯试样力学性能并无显著影响。

非对称梯度型多层发泡聚乙烯 AGD-I, AGD-R1, AGD-R2 的应力-应变曲线如图 5b 所示。由图 5b 可以看出,3 种不同密度梯度变化的非对称梯度多层发泡聚乙烯的应力-应变曲线非常临近,特别是其中的 AGD-R1 和 AGD-R2,曲线基本重合。这一结果表明,在单层发泡聚乙烯的密度呈现非对称梯度分布情况下,密度分布的方式基本不影响所形成的多层发泡聚乙烯的压缩力学性能。不管密度分布是顺序增加还是随机分布,静态压缩总是由发泡率较高、密度较小的一层,向发泡率较低、密度较大的一层逐渐发生塑性变形,其密度梯度变化形式并不显著影响非对称梯度多层发泡聚乙烯的力学性能。

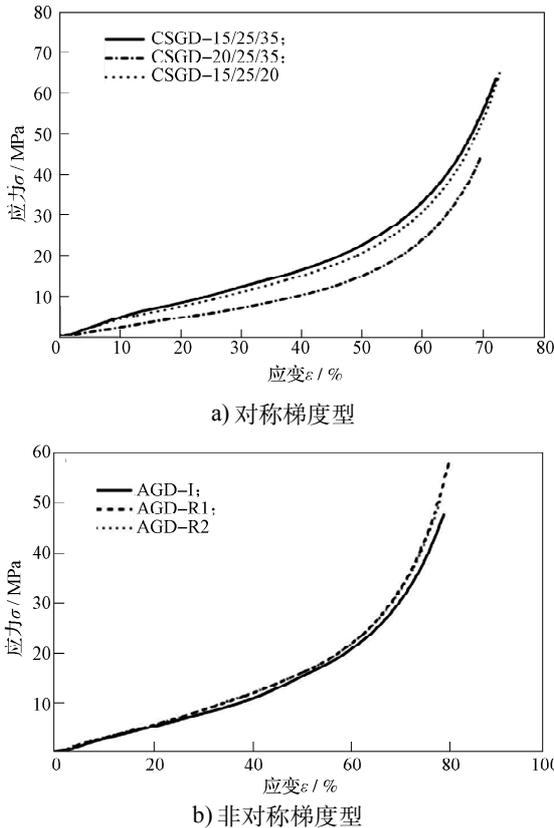


图 5 不同密度梯度变化的多层发泡聚乙烯的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of specimens with different density gradient style

2.3 压缩速度对对称梯度型多层发泡聚乙烯力学性能的影响

分别以 2, 12, 50 mm/min 3 种不同压缩速度对试样 CSGD-15/25/35 施加压缩载荷,得到的应力-应变曲线如图 6a 所示,由该图可以看出,随着压缩速度的

增加,相同应变下的应力逐渐增大,存在着一定的应变率效应。

为了研究对称梯度型多层发泡聚乙烯存在的应变率效应是由材料本身的应变强化效应引起的、还是由密度梯度分布的结构引起的,本研究对恒密度型多层发泡聚乙烯(UD-30)分别以 2, 12, 50 mm/min 3 种压缩速度进行试验,所得应力-应变曲线如图 6b 所示。由图 6 可以得知,随着压缩速度的增加,恒密度型多层发泡聚乙烯的力学性能表现出与对称梯度型多层发泡聚乙烯相同的变化规律,即随着压缩速度的增加,相同应变下材料的应力增加。由此可得,对称梯度型多层发泡聚乙烯存在的应变率效应主要来自于发泡聚乙烯本身的应变强化,而非密度的梯度变化。

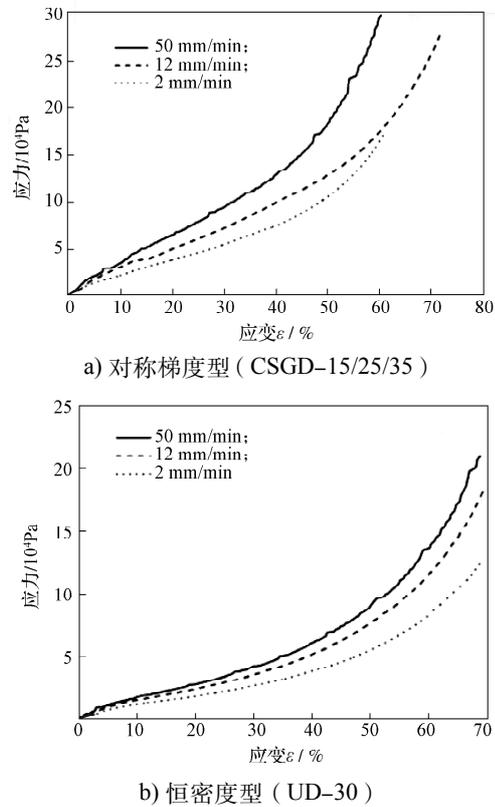


图 6 不同压缩速度下的多层发泡聚乙烯的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of specimen under different compressive velocities

由于闭孔发泡聚乙烯为微孔结构,当施加压缩载荷时,除了孔壁承担一部分载荷外,胞元内封闭的大量空气受到压缩后产生的反作用力也会影响多层发泡聚乙烯试样的力学性能。当压缩速度较慢时,气体逐渐从气孔内逸出;当压缩速度增加时,气体无法在短时间内迅速逸出,压缩载荷将对微孔内的气体做功,因此表现出一定的应变率效应。

3 结论

本文通过准静态压缩试验研究了密度梯度变化对多层发泡聚乙烯力学性能的影响。结果表明:

1) 无论是CSCD型还是AGD型多层发泡聚乙烯,其平台应力均比UD型的有一定程度的提高,且CSCD型多层发泡聚乙烯的平台应力略高于AGD型;

2) CSCD型多层发泡聚乙烯的上、下表皮层发泡聚乙烯的发泡倍率(密度)显著影响CSCD型多层发泡聚乙烯的力学性能,随着上、下表皮层的发泡倍率增加(对应的密度减少),所制得的CSCD型多层发泡聚乙烯的压缩力学性能趋于降低,而芯层发泡聚乙烯的发泡倍率(密度)对整体多层发泡聚乙烯试样力学性能并无显著影响;

3) 对于AGD型多层发泡聚乙烯而言,密度分布的方式对所形成的多层发泡聚乙烯的压缩力学性能无明显影响;

4) CSCD型多层发泡聚乙烯存在着一定的应变率效应,这种应变率效应主要来自于发泡聚乙烯本身的应变强化,而非密度的梯度变化。

参考文献:

- [1] 刘乘,任亚东.几种常用缓冲材料性能的研究[J].包装工程,2010,31(7):117-119.
LIU Cheng, REN Yadong. Research on Properties of Several Cushion Materials[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7): 117-119.
- [2] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 183-191.
- [3] RUIZ-HERRERO J L, RODRÍGUEZ-PÉREZ M A. Prediction of Cushion Curves for Closed Cell Polyethylene-Based Foams. Part I: Modeling[J]. Cellular Polymers, 2005, 24(6): 329-346.
- [4] RUIZ-HERRERO J L, RODRÍGUEZ-PÉREZ M A. Prediction of Cushion Curves for Closed Cell Polyethylene-Based Foams. Part II: Experimental[J]. Cellular Polymers, 2006, 25(3): 159-175.
- [5] 姜久红,王志伟.基于NLAR发泡聚乙烯塑料跌落冲击试验与建模[J].北京交通大学学报,2008,32(3):70-72.
JIANG Jiuhong, WANG Zhiwei. Experiment and Modeling on Extruded Polyethylene Dropping Impact Based on NLAR [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32(3): 70-72.
- [6] 高德,卢富德.聚乙烯缓冲材料多自由度跌落包装系统优化设计[J].振动与冲击,2012,31(3):69-72.
GAO De, LU Fude. Optimization Design of MDOF Package Cushioning System Made of Polyethylene[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 69-72.
- [7] 张炜,薛飞,卢富德,等.考虑易损件物品-EPE缓冲系统冲激响应分析[J].振动与冲击,2015,34(9):116-119.
ZHANG Wei, XUE Fei, LU Fude, et al. Impact-Response Analysis of the System Composed of Critical Component and EPE Cushion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(9): 116-119.
- [8] 方婷,康勇刚,杨帅.环境温度对聚乙烯发泡材料动态缓冲性能的影响[J].包装工程,2012,33(21):41-44.
FANG Ting, KANG Yonggang, YANG Shuai. Effect of Environment Temperature on Dynamic Cushioning Performance of EPE[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(21): 41-44.
- [9] MARCONDES J, HATTON K, GRAHAM J, et al. Effect of Temperature on the Cushioning Properties of Some Foamed Plastic Materials[J]. Packaging Technology and Science, 2003, 16(2): 69-76.
- [10] 刘继飞,韩雪山,王伟,等.蠕变对发泡聚乙烯缓冲性能影响的研究[J].包装工程,2014,35(3):48-51,63.
LIU Jifei, HAN Xueshan, WANG Wei, et al. Effects of Cushion Property of Foamed Polyethylene EPE Cushioning Material Exerted by the Creep[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 48-51, 63.
- [11] 田芑,滑广军.尺度效应对发泡聚乙烯静态缓冲性能的影响[J].包装学报,2013,5(4):30-33.
TIAN Peng, HUA Guangjun. Impact of Scale Effect on Cushioning Properties of Expanded Polyethylene[J]. Packaging Journal, 2013, 5(4): 30-33.
- [12] 冯勇.EPE缓冲材料双向性能比较分析[J].中国包装工业,2007(10):47-48.
FENG Yong. Comparative Analysis of mechanical Properties of Cushioning Material on Two Direction[J]. China Packaging Industry, 2007(10): 47-48.

(责任编辑:廖友媛)