

## EPO材料缓冲性能的探究

张涵茵<sup>1</sup>, 王柳<sup>2</sup>, 王玉龙<sup>1</sup>

(1. 武汉大学, 武汉 430079; 2. 义乌工商职业技术学院, 浙江 义乌 322000)

**摘要:** **目的** 通过试验对比 EPE, EPS, EPO 等 3 种材料缓冲性能的优劣。**方法** 对一定规格的 3 种材料试样进行静态压缩试验、动态压缩试验, 并结合 Ansys 有限元仿真技术, 进行数据处理分析。**结果** 在静态缓冲特性试验中, 当材料所受应力大于 3.5 kPa 且小于 180 kPa 时, EPO 与 EPE 及 EPS 的静态缓冲性能系数大小关系为 EPE<EPO<EPS; 当应力小于 3.5 kPa 或者大于 180 kPa 时, EPO 的静态缓冲系数最小, 即此时 EPO 的静态缓冲性能优于 EPE 和 EPS。从动态缓冲特性试验中可知, 静应力小于 10 kPa 时, 3 种材料的缓冲性能大小为 EPS<EPO<EPE; 当静应力大于 14 kPa 时, 缓冲性能大小排序为 EPS>EPO>EPE; 静应力大小介于 10 kPa 和 14 kPa 之间时, 3 种材料具有相似的缓冲效果。EPO 材料动态缓冲特性处于 EPE 以及 EPS 之间, 当静应力较大时, EPO 呈现出与 EPE 更相近的性能, 缓冲性能较 EPS 有所提升。**结论** 经测试比较, EPO 材料具有较好的缓冲性能, 某些环境下可以作为新缓冲包装材料使用, 未来有较好的发展前景。

**关键词:** EPO; 静态压缩; 动态冲击; 有限元分析; 缓冲性能

**中图分类号:** TS484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)21-0099-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.21.015

## Cushioning Performance of EPO Materials

ZHANG Han-yin<sup>1</sup>, WANG Liu<sup>2</sup>, WANG Yu-long<sup>1</sup>

(1. Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Yiwu Industrial and Commercial College, Yiwu 322000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to compare the advantages and disadvantages of cushioning performance of EPE, EPS and EPO through tests. Static compression test, dynamic compression test and Ansys finite element simulation technology were used for data processing and analysis of three kinds of material samples with certain specifications. In the static cushioning characteristic tests, when the stress on the material was greater than 3.5 kPa and less than 180 kPa, the relationship between EPO, EPE and EPS static cushioning performance coefficients was EPE<EPO<EPS. When the stress was less than 3.5 kPa or greater than 180 kPa, the static cushioning coefficient of EPO was the least, i.e. the static cushioning performance of EPO was superior to EPE and EPS at this time. It could be seen from the dynamic cushioning characteristic tests that, when the static stress was less than 10 kPa, the cushioning performance of these three materials was EPS<EPO<EPE. When the static stress was more than 14 kPa, the priority of cushioning performance was EPS>EPO>EPE. When the static stress was between 10 kPa and 14 kPa, these three materials had similar cushioning effect. When the dynamic cushioning performance of EPO was in the middle of EPE and EPS, and the static stress was large, the performance of EPO was more similar to EPE, and the cushioning performance was improved compared with EPS. Through testing and comparison, EPO material has better cushioning characteristics, and can be used as new cushioning package in some environments, so it has a better development prospect in the future.

收稿日期: 2019-05-28

作者简介: 张涵茵 (1995—), 女, 武汉大学硕士生, 主攻运输包装和包装结构优化设计。

通信作者: 王玉龙 (1965—) 男, 武汉大学副教授, 主要研究方向为运输包装和包装结构优化设计。

KEY WORDS: EPO; static compression; dynamic shock; finite element analysis; cushioning performance

发泡聚苯乙烯/乙烯互聚物(EPO)是由未交联的聚乙烯和苯乙烯单体互聚而成的一种新型材料<sup>[1-2]</sup>。EPO生产工艺在国内还处于探索阶段,在缓冲包装领域的技术尚未成熟。目前,赵敏<sup>[3]</sup>将EPO与传统材料进行了对比分析,发现EPO具有很好的耐药性、出色的抗冲击性能以及撕裂强度,作为等离子电视的缓冲包装具有很好的保护作用。温时宝等<sup>[4]</sup>将EPO的静态压缩曲线与EPS和EPE进行了试验对比,结果表明EPO的静态压缩曲线同样可以分为弹性阶段、塑性屈服阶段以及致密阶段,且其静态缓冲系数大于EPE材料,小于EPS材料。由于EPO兼具EPS与EPE的特点,综合性能有显著提升,因而在缓冲材料中逐渐显示出优势<sup>[5-8]</sup>,具有良好的发展前景。文中通过对比试验,采取静态压缩试验及动态冲击试验并结合Ansys有限元仿真技术比较EPO、EPS以及EPE等3种材料在跌落工况下的缓冲性能优劣<sup>[9]</sup>。

### 1 静态压缩试验

#### 1.1 试验过程

试验选用密度为 28 kg/m<sup>3</sup> 的 EPE、30 kg/m<sup>3</sup> 的 EPS、29 kg/m<sup>3</sup> 的 EPO 等 3 组试样,每组各 3 件,尺寸均为 100 mm×100 mm×30mm。根据 GB/T 8168—2008<sup>[10]</sup>中规定试样静态压缩的试验方法进行测试。试验样品在相对湿度为 50%、温度为 23℃的条件下预处理 24 h,随后在万能材料试验仪上进行试验操作。

#### 1.2 EPO, EPS, EPE 的静态压缩性能对比

应力-应变曲线(σ-ε)对比见图1。

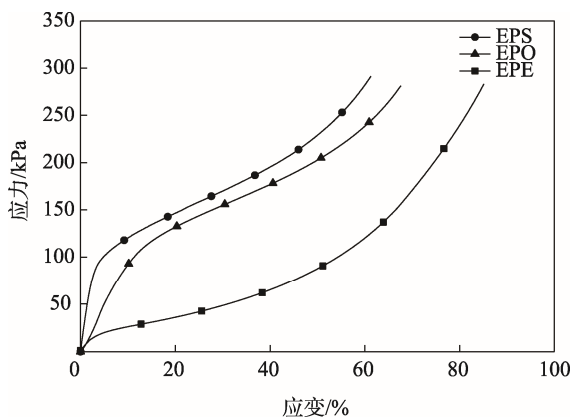


图1 EPS, EPO, EPE 材料的应力-应变曲线对比  
Fig.1 Comparison of σ-ε curves of EPS, EPO and EPE materials

缓冲系数-最大静应力曲线(C-σ)对比见图2。

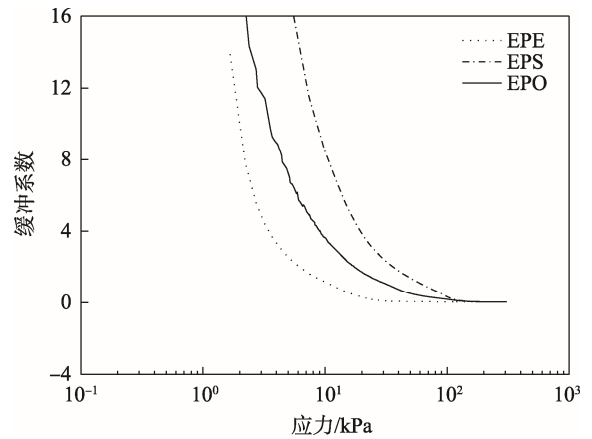


图2 EPS, EPO, EPE 材料的缓冲系数-最大静应力曲线  
Fig.2 C-σ curves of EPS, EPO and EPE materials

#### 1.3 分析与结论

由图3可以得到以下结论。

1) EPO 材料的应力-应变曲线为典型的泡沫塑料力学模型,有 3 个阶段,即胡克线性阶段、塑性平台阶段、密实化阶段。由于结构上的相似,EPO 材料呈现出与 EPS 更相似的特性。3 种材料的弹性模量及屈服强度大小满足 EPS>EPO>EPE。

2) 由缓冲系数-最大静应力曲线的数据可以看到当材料所受应力大于 3.5 kPa 且小于 180 kPa 时,三者静态缓冲性能系数大小排序为 EPE<EPO<EPS,即 EPO 静态缓冲性能处于 EPS 以及 EPE 的中间;而当应力小于 3.5 kPa 或者大于 180 kPa 时,EPO 的静态缓冲系数最小,即此时 EPO 静态缓冲性能均优于 EPE 和 EPS。

综上所述,EPO 材料各个阶段的静态吸能效率都要优于 EPS,可以非常好地替代 EPS。与 EPE 材料相比,EPO 的静态缓冲性虽略差<sup>[11-13]</sup>,但 EPO 的可模塑性及尺寸稳定性更好,故在包装设计时可依据实际需求合理选取缓冲材料。

### 2 动态压缩试验

#### 2.1 基本理论

同种缓冲材料在不同厚度和跌落高度下得到的动态特征曲线存在一定关联,对于闭孔发泡塑料而言,其动应力 σ<sub>m</sub> 动能 E 之间存在指数关系<sup>[14-15]</sup>为:

$$\sigma_m = ae^{bE} \tag{1}$$

$$\sigma_m = G_{\max} \sigma_s \quad (2)$$

$$E = \frac{\sigma_s H}{T} \quad (3)$$

式中： $G_{\max}$  为最大加速度； $\sigma_s$  为静应力； $H$  为跌落高度； $d$  为厚度； $a, b$  为常数。

为了全面描述 EPO 的动态缓冲性能，文中拟用应力能量法预测 EPO 材料在不同厚度和跌落高度下的缓冲性能。

### 2.2 试验过程

该试验按照 GB/T 8167—2008<sup>[16]</sup> 执行，材料准备数量、公称密度和试验条件与静态压缩试验相同。设置跌落高度为 460 mm，调整重锤质量为 8 kg，将样品平整固定于跌落台上，准备进行冲击。冲击完成后将数据滤波再记录最大加速度值。该试样需按照同样的方法连续进行 5 次冲击，且冲击间隔应大于 1 min。依次切换样品重复试验，采集 EPO 曲线上的另外 4 个数据点，即可完成缓冲系数-最大静应力曲线的绘制。按同样的方法对 EPS 材料以及 EPE 材料进行试验，对比 3 种材料曲线特征。

### 2.3 试验数据处理

为了分析不同跌落次数下 3 种材料的性能变化，将试验中得到的静应力以及最大加速度的均值输入 Origin 进行拟合，结果见图 3。

### 2.4 结果与分析

根据拟合结果可得出以下结论。

1) 3 种材料的 R-square 值均达到 90% 以上，表明试验数据较为准确，较好地符合缓冲材料的动态力学规律。在单次冲击作用下，EPS 呈现出最佳的动态缓冲性能，EPO 其次，EPE 相较而言最差。随着冲击次数的增加，EPS 缓冲性能衰减最快，EPE 较为稳定，EPO 处于两者之间。说明与 EPS 相比，EPO 的耐冲击性能有明显提升。

2) 静应力小于 10 kPa 时，缓冲性能大小为 EPS<EPO<EPE；静应力大于 14 kPa 时，缓冲性能大小为 EPS>EPO>EPE；静应力大小介于 10 kPa 与 14 kPa 之间时，3 种材料具有相似的缓冲效果。

综上所述，EPO 材料动态缓冲特性处于 EPE 和 EPS 中间。当静应力较小时，EPO 与 EPS 更加相似；在静应力较大时，呈现出与 EPE 更相近的性能。

## 3 仿真跌落结果分析

### 3.1 包装件仿真模型建立

根据前面对 3 种材料静态与动态压缩试验的探究，利用 Ansys 进行包装件缓冲特性仿真分析<sup>[17-19]</sup>，进一步研究其在使用中的缓冲性能。

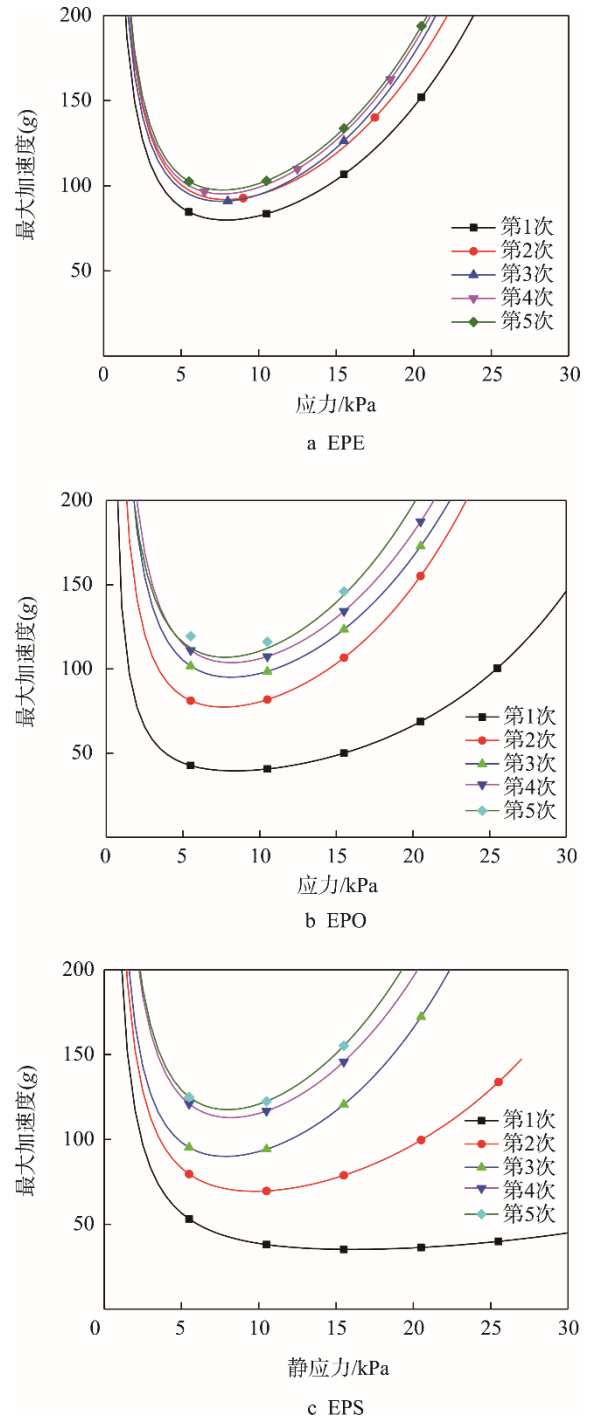


图 3 EPE, EPO, EPS 材料在不同冲击次数下的拟合曲线  
Fig.3 Fitting curves of EPE, EPO and EPS under different impact times

以某啤酒瓶为包装产品（见图 4），其瓶口直径为 26 mm，高为 312 mm，瓶底直径为 78 mm，取缓冲衬垫尺寸参数为 100 mm×100 mm×50 mm，地面实验台尺寸为 1000 mm×1000 mm×50 mm，包装件模型距离地面 10 mm。建立有限元模型，见图 5。包装中各部件的材料参数见表 1。

考虑到此包装件的实际跌落情况，该分析模型主要含有 2 组接触，衬垫与玻璃瓶的接触以及衬垫与跌

落面的接触。其中第2组接触由于在系统侦测半径之外,因此需要人为添加,2组接触的接触参数见表2。

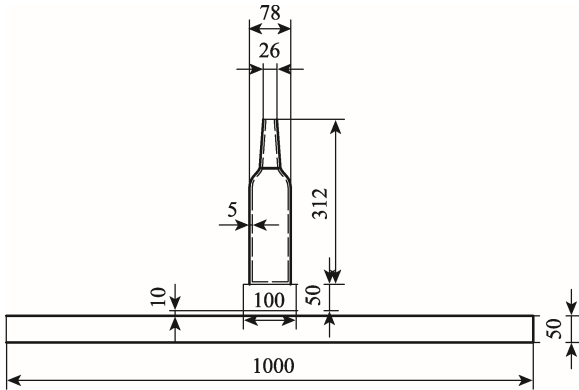


图4 包装件装配尺寸示意  
Fig.4 Assembly dimension diagram of package

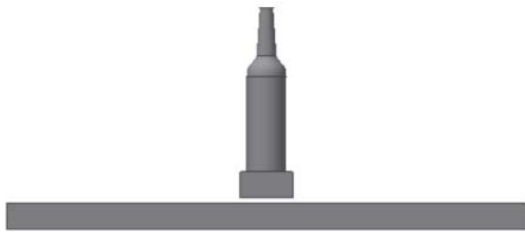


图5 包装件装配模型  
Fig.5 Assembly model of package

表1 包装件中各部件的材料参数

Tab.1 Material parameters of each part in the package

零件	材料名称	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ MPa	泊松比	材料属性
玻璃瓶	玻璃	2500	2.21×10 <sup>5</sup>	0.22	柔性体
地面	结构钢	7850	2×10 <sup>5</sup>	0.3	刚性体
缓冲衬垫	EPO	29	2.7	0.1	柔性体
	EPE	28	0.6	0.1	柔性体
	EPS	30	4.5	0.1	柔性体

表2 包装模型中接触参数

Tab.2 Contact parameters in the packaging model

编号	接触面	目标面	接触类型	接触行为
1	缓冲衬垫	玻璃瓶	摩擦接触	对称接触
2	缓冲衬垫	地面	摩擦接触	对称接触

为了得到形状规则的六面体单元,文中采用虚拟拓扑工具对玻璃瓶进行面或线条分割,并采用多区域以及面映射的网格划分方式对玻璃瓶进行划分。地面及缓冲衬垫由于形状较为规整,则由全局网格控制方式自动生成。检查网格可以发现网格质量的平均值达到了97%,网格质量较高,可用于仿真分析。

### 3.2 施加载荷及边界条件

在包装件的跌落分析中,重力是主要的驱动力,即对各个部件施加重力场。由于地面在跌落分析中要

求是约束状态,因此分析过程中将该部件用 Fixed Support 命令固定,被定义为刚性体。参考 ISTA 包装系列运输标准,将该仿真分析的跌落高度定义为 460 mm。同时为了减少整个过程的分析时间,为包装件添加等效初速度(3.003 m/s),方向竖直向下。通过相关计算预测,将分析结束时间设置为 0.02 s,并输出 40 个数据点。

### 3.3 仿真跌落结果

1) 各部件的应变分布。为了更加直观地对比 3 个缓冲系统中应变的变化,现找出 3 种缓冲系统中玻璃瓶以及缓冲垫发生最大应变所在的节点,提取该节点应变随时间变化的曲线,见图 6—7。

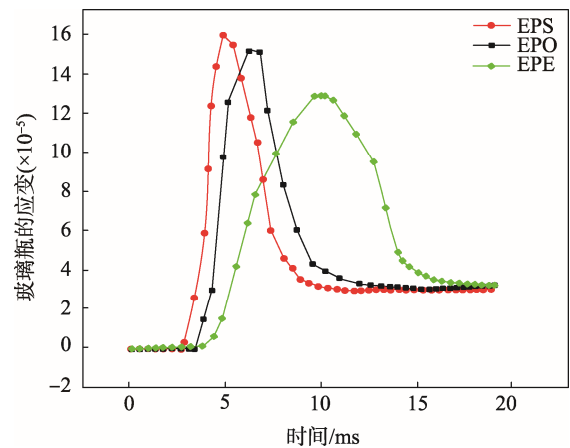


图6 各系统中玻璃瓶的应变-时间  
Fig.6 Strain-time curves of glass bottles in each system

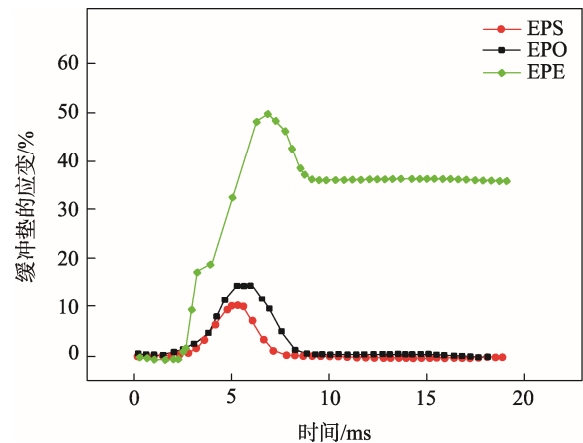


图7 各系统中缓冲垫的应变-时间  
Fig.7 Strain-time curves of cushions in each system

2) 各部件的应力分布。根据分析结果,提取 3 种缓冲系统中玻璃瓶最大应力所在节点的应力-时间曲线与各缓冲衬垫最大应力所在节点的曲线,见图 8—9。

3) 玻璃瓶的加速度分布。根据结果绘制 3 种缓冲系统最大加速度所在节点的加速度-时间曲线,见图 10。

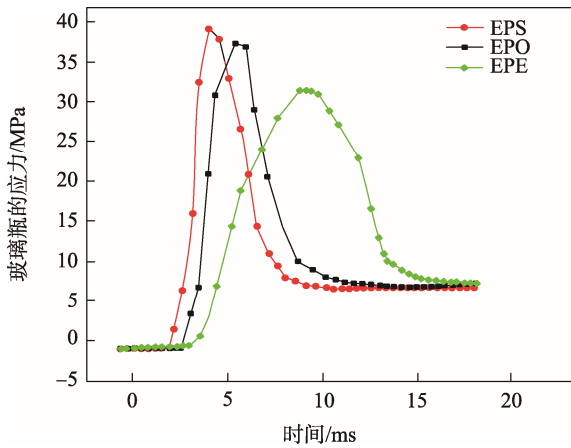


图 8 各系统中玻璃瓶的应力-时间曲线

Fig.8 Stress-time curves of glass bottles in each system

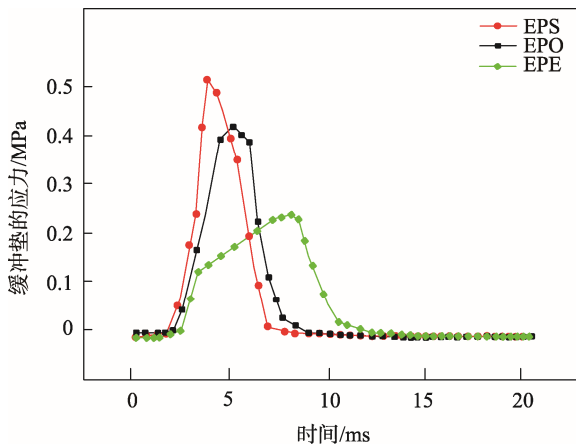


图 9 各系统中缓冲衬垫的应力-时间曲线

Fig.9 Stress-time curves of cushions in each system

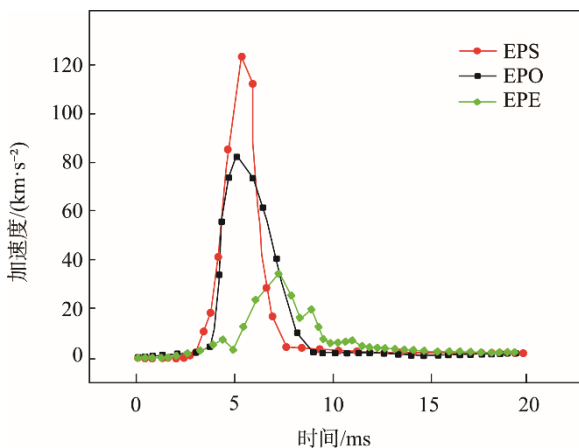


图 10 各系统中玻璃瓶的加速度-时间曲线

Fig.10 Acceleration-time curve of the glass bottle in each system

### 3.4 分析与讨论

1) 在相同的跌落状态下，缓冲衬垫的应变大小关系为  $EPE > EPO > EPS$ ；其应力大小关系为  $EPE < EPO < EPS$ ；系统中产品的加速度大小关系为  $EPE < EPO < EPS$ 。

2) EPE 的缓冲性能最优，EPS 相对最差，EPO 的缓冲性能处于 EPS 和 EPE 之间；EPS 材料与 EPO 材料的缓冲力学模型较为类似。

3) 尽管 EPE 的缓冲性能最优，但该材料发生的应变值最大，对于质量较大的产品，用 EPE 材料易发生“触底”现象。由此可见，从实际工程角度出发，当产品质量较大时，应使用 EPO，因其缓冲性能优于另外 2 种材料。

## 4 结语

采用静态压缩试验对比分析了 EP, EPS, EPE 材料的静态缓冲性能。通过分析应力-应变曲线，发现 EPO 材料的弹性模量及屈服强度介于 EPS 以及 EPE 之间；EPO 与 EPS 具有更加相似的曲线特性。

主要对比分析了 EPO, EPS, EPE 材料在动态冲击下的力学性能，并运用应力能量法对动态缓冲试验下的数据进行处理。通过对比 3 种材料的  $G_{max}-\sigma$  拟合曲线，发现 3 种材料的耐冲击性能优劣为  $EPE > EPO > EPS$ 。当应力较小时 EPO 的动态缓冲曲线与 EPS 更相似，应力较大时 EPO 的曲线特征与 EPE 更为接近。

采用 Ansys Workbench 求解器，对比研究了不同缓冲材料为缓冲垫时，包装件的跌落仿真结果。试验表明在系统设置跌落工况下，3 种材料的动态缓冲性能优劣顺序为  $EPE > EPO > EPS$ ，即此时 EPO 材料的缓冲性介于 EPS 和 EPE 之间。

经过试验以及数据分析，EPO 材料在静态压缩下的缓冲性能虽较差，但在动态压缩试验中，缓冲特性较好，尤其是产品质量较大时，且 EPO 与 EPS 具有较为相似的曲线特性，可以作为 EPS 较好的替代材料。目前在包装行业已经逐渐开始运用，如将 EPO 塑模后用做汽车零件、IT 设备、电脑服务器、等家电产品的缓冲垫；在其他领域，如冲浪板、头盔、飞机模型中也有广泛的使用。随着人们对包装运输安全性的逐渐重视，EPO 材料将有更加广阔的发展空间。

### 参考文献：

[1] KRUPENSKI S M. Interpolymer Resin Particles[P]. USA: CN1906031, 2007-01-31.  
 [2] 温时宝, 罗方向, 赵文婷. EPO 泡沫塑料及其应用[J]. 塑料包装, 2010, 20(3): 31—33.  
 WEN Shi-bao, LUO Fang-xiang, ZHAO Wen-ting. EPO Foam and Its Application[J]. Plastics Packaging, 2010, 20(3): 31—33.  
 [3] 赵敏. EPO 材料在等离子(PDP)电视包装上的应用[J]. 电子世界, 2013(1): 70—72.  
 ZHAO Min. Application of EPO Material on Plasma (PDP) TV Package[J]. Electronic World,

- 2013(1): 70—72.
- [4] 温时宝. EPO 泡沫的静态压缩性能及其与 EPS 和 EPE 泡沫的比较[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 10—12.  
WEN Shi-bao. Static Compression Performance of EPO Foam and Its Comparison with EPS and EPE Foam[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 10—12.
- [5] MOREU Y M, MILLS N J. Rapid Hydrostatic Compression of Low-density Polymeric Foams[J]. Polymer Testing, 2004, 23(3): 313—322.
- [6] LU F D, HUA G J, WANG L S, et al. A Phenomenological Constitutive Modelling of Polyethylene Foam Under Multiple Impact Conditions[J]. Packaging Technology and Science, 2019, 32(7): 367—379.
- [7] 杨帅. EPE 缓冲性能的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.  
YANG Shuai. Research on EPE Buffering Performance[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.
- [8] 王志亮, 诸斌. EPS 泡沫冲击压缩和吸能特性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4): 630—636.  
WANG Zhi-liang, ZHU Bin. Experimental Study on Foam Impact Compression and Energy Absorption Characteristics of EPS[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(4): 630—636.
- [9] 丁玉平. 基于 ANSYS/LS—Dyna 的某缓冲包装缓冲特性分析与优化[D]. 无锡: 江南大学, 2014.  
DING Yu-ping. Analysis and Optimization of Buffering Characteristics of a Buffering Package Based on ANSYS/LS-Dyna[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [10] GB/T 8168—2008, 《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》[S].  
GB/T 8168—2008, "Methods of Static Compression Test for Packing Buffer Materials"[S].
- [11] 陈满儒, 刘兰. 基于应力-能量法的缓冲包装材料性能研究[J]. 包装工程, 2018, 39(5): 44—47.  
CHEN Man-ru, LIU Lan. Research on Properties of Buffer Packaging Materials Based on Stress-energy Method[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5): 44—47.
- [12] LOBOS J, RODRIGUEZ-PREZ M A, DELCARPIO M, et al. Mechanical Behaviour of High Density Polyethylene Based Foams[C]// KIM H, YANG JF, SEKINO T, et al. Materials Science Forum: 10th International Symposium on Eco-materials Processing and Design, Zürich: Trans Tech Publications, 2009: 781—784.
- [13] 杜骋, 杨军. 聚苯乙烯泡沫 (EPS) 的特性及应用分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(3): 138—142.  
DU Cheng, YANG Jun. Characteristics and Application Analysis of EPS[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001, 31(3): 138—142.
- [14] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012: 110—115.  
PENG Guo-xun. Logistics Transportation Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012: 110—115.
- [15] DAUM M. Evaluation of Predicted Deceleration Values from the Stress-energy Method Compared to Actual Deceleration Values from the ASTM D1596 Test Method[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2011, 39(6):104031.
- [16] GB/T 8167—2008, 《包装用缓冲材料动态压缩试验方法》[S].  
GB/T 8167—2008, "Dynamic Compression Test Method for Packing Buffer Materials"[S].
- [17] KOOHBOR B, KIDANE A, LU W Y. Dynamic Compressive Response of Polymeric Foams Subjected to Direct Impact Loading[C]// Proceedings of the American Society for Composites: 31st Technical Conference, Columbia: Destech Publications, 2015: 1685—1695.
- [18] 李占营. 基于 Ansys 的复合材料有限元分析和应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017: 33—65.  
LI Zhan-ying. Finite Element Analysis and Application of Composite Materials Based on Ansys[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2017: 33—65.
- [19] 孙德强. 多孔缓冲材料有限元结构分析与设计方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 23—48.  
SUN De-qiang. Finite Element Analysis and Design Method for Porous Buffer Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 23—48.