

改性可发性聚苯乙烯共混发泡材料缓冲性能研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.1011

石勇 刘奇龙
金澳威 周懿欣
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: 改性可发性聚苯乙烯 (GPO) 共混发泡材料是一种新型的缓冲包装材料。以 GPO 材料为研究对象, 进行了静态压缩试验, 利用 MATLAB 软件对实验数据进行了处理, 获得了应力-应变曲线与缓冲系数-最大应力曲线, 并基于最小缓冲系数和最大应力对某锂离子蓄电池产品进行了缓冲衬垫设计, 对比几种缓冲材料的设计方案。研究表明, 在 230~320 kPa 应力区间, GPO 泡沫材料具有最优的缓冲性能, 最小缓冲系数为 2.6 左右, GPO 材料适合作为重型产品的缓冲包装。本研究对储运空间的合理利用和物流包装方案的改进具有重要意义。

关键词: 缓冲材料; 静态压缩试验; 缓冲系数; 缓冲包装

中图分类号: TB485.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)01-0088-06

引文格式: 石勇, 刘奇龙, 金澳威, 等. 改性可发性聚苯乙烯共混发泡材料缓冲性能研究 [J]. 包装学报, 2025, 17(1): 88-93.

1 研究背景

缓冲包装材料的主要功能是吸收包装件中物品受到的冲击与振动, 使内装物品免受损坏^[1]。在众多缓冲包装材料中, 纸制和塑料缓冲材料占据了主导地位。塑料缓冲材料因其轻质、易于成型和良好的缓冲性能而广泛应用, 其中发泡塑料缓冲材料和气垫缓冲材料是两大主要类别。发泡塑料缓冲材料主要包括可发性聚苯乙烯 (expandable polystyrene, EPS)、可发性聚乙烯 (expandable polyethylene, EPE) 和发泡聚丙烯 (expanded polypropylene, EPP) 等^[2-3]。随着我国经济发展方式的转型升级, 人们对包装材料的环保性能提出了更高的要求, 学者们通过对材料

的改性提升缓冲材料的环保性能。一种新型改性可发性聚苯乙烯 (grand polystyrene beads, GPO)^[4], 因其优异的耐冲击性和韧性而受到关注。GPO 材料主要由聚苯乙烯构成, 并含有改性材料以及质量分数为 4%~6% 的发泡剂戊烷, 通过一步法挤出工艺生产。与传统泡沫材料相比, GPO 材料在多个应用场景中展现出了潜力, 特别是在高端家电、液晶面板、手机平板等电子产品的包装领域。在环境政策方面, GPO 材料的生产过程响应了国家对碳中和与碳达峰的号召, 通过物理混合、挤出、造粒的方式, 相较于传统化学反应工艺, 显著减少了废弃物和污染物的排放, 体现了其环保节能的优势。

EPS、EPE、EPP 等泡沫材料一般是基于压缩吸

收稿日期: 2024-09-10

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2023YFC3904603); 湖南省自然科学基金资助项目 (2022JJ30223); 湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目 (21A0353); 湖南省高等学校教学改革研究项目 (HNJG-2021-0123); 大学生创新创业训练计划项目 (S202311535012)

作者简介: 石勇, 男, 硕士生, 主要研究方向为缓冲包装, E-mail: m22085600006@stu.hut.edu.cn

通信作者: 刘奇龙, 男, 讲师, 博士, 主要从事功能包装新材料与技术的研究, E-mail: liuqilong79@163.com

能理论进行缓冲衬垫设计, 主要有基于缓冲系数 - 最大应力曲线的设计方法和基于最大加速度 - 静应力的设计方法。这两种设计方法回避了材料的线性和非线性问题, 使用起来比较简单, 已经建立起了完整的理论计算、结构设计及实验测试方法体系^[5-8]。都学飞等^[9]研究了不同厚度的 EPS 缓冲材料的压缩变形回复性、载荷 - 位移曲线等性能。结果表明, EPS 缓冲材料的回复性、永久变形与材料的厚度有很大关系, 厚度越大吸收的能量越多, 缓冲性能越好。陈磊^[10]对不同发泡倍数和不同尺寸 EPP 泡沫材料进行了静态压缩和动态缓冲分析。基于缓冲系数 - 最大应力曲线的设计方法中, 材料的最小缓冲系数与该材料能够达到的最小衬垫厚度参数呈线性关系, 缓冲系数越小, 则缓冲衬垫能够达到的极限厚度越小, 包装件整体尺寸也越小, 意味着能够进行更大限度的包装减量化与流通减量化。EPE 材料虽然具有良好的缓冲性能及环保性能, 但由于最小缓冲系数在 4 左右, 进行缓冲衬垫设计时, 衬垫厚度比较大, 导致包装件整体尺寸较大, 包装及物流成本较高^[11]。因此, 开发小缓冲系数的泡沫材料, 能够极大地减少单件产品包装的尺寸, 降低物流成本。

由于 GPO 材料的应用时间较短, 目前还缺少对 GPO 材料缓冲性能的深入研究, 其缓冲系数 - 最大应力曲线或最大加速度 - 静应力曲线尚未公开。本研究通过静态压缩试验, 对两种密度的 GPO 泡沫材料进行性能测试, 利用 MATLAB 软件处理得到了应力 - 应变曲线和缓冲系数 - 最大应力曲线, 并与 EPP、EPE、EPS 泡沫材料的性能进行对比分析, 研究结果将为 GPO 泡沫材料的合理应用提供科学依据。

2 实验

2.1 偏光测试

选用 GPO 泡沫材料, 以及最常用的 EPP、EPE、EPS 泡沫材料 (见图 1), 试样的规格、材料、密度等参数如表 1 所示。



图 1 试样

Fig. 1 Samples

表 1 试样参数

Table 1 Sample parameters

种类	密度 / (kg·m ⁻³)	尺寸 /mm ³
GPO-1	26	25 × 25 × 5
GPO-2	27	25 × 25 × 5
EPP	25	25 × 25 × 5
EPE	30	25 × 25 × 5
EPS	27	25 × 25 × 5

实验设备为偏光显微镜, DM2500P 型, 德国徕卡公司。将表 1 中的试样放置于显微镜两个盖玻片之间, 利用偏光显微镜从低倍镜开始, 逐渐增加放大倍数, 直至找到试样的清晰微观结构图。

2.2 静态压缩试验

2.2.1 材料与设备

选用两种密度的 GPO 泡沫材料 (26, 27 kg/m³), 以及最常用的 EPP、EPE、EPS 泡沫材料, 裁成尺寸为 100 mm × 100 mm × 26 mm 的试样。实验设备为微机控制电子万能 (拉力) 试验机, CMT4104 型, 新三思 (深圳) 实验设备有限公司, 最大试验力为 10 kN, 精度等级为 0.5 级。

2.2.2 试验过程

参考标准 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》^[12]进行静态压缩试验。试验前, 将试样置于温湿度控制箱中进行 24 h 处理, 温度设置为 25 ℃, 湿度为 50%。采用微机控制电子万能 (拉力) 试验机, 以 2 mm/min 的速度进行加载, 采样触发载荷为 0.5 N, 压缩最大位移设定为材料厚度的 80%, 采集载荷 - 位移数据。

2.2.3 数据处理

1) 应力 - 应变曲线

参照标准 GB/T 8166—2011《缓冲包装设计》中的数据处理方式, 对测试得到的载荷 - 位移数据按式 (1) ~ (2) 进行计算^[13]。利用 MATLAB 软件对载荷 - 位移数据进行处理, 计算得到应力 - 应变数据, 绘制应力 - 应变曲线。

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

$$\varepsilon = x/L, \quad (2)$$

式中: σ 为应力, MPa; ε 为应变; F 为载荷, N; A 为抗压试验机压头的横截面积, mm²; x 为压缩位移, mm; L 为试样厚度, mm。

2) 缓冲系数 - 最大应力曲线

将应力 - 应变曲线下的面积离散为若干三角形区域, 按照式 (3) ~ (5) 进行计算, 利用 MATLAB

进行数据处理, 可得到缓冲系数-最大应力曲线。

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

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

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

式中: e 为达到应力 σ 时材料的单位变形成, N·m; e_i 为在应力 σ_i 下材料的累积单位变形成, $i=1, 2, \dots, n$, N·m; e_k 为第 k 个三角形区域的应变能, $k=1, 2, \dots, i$, N·m; C 为缓冲系数。

3 结果与分析

3.1 微观结构分析

在偏光显微镜下观察 EPP、EPS、EPE 和 GPO 泡沫材料的微观结构, 结果如图 2 所示。由图 2 可知, EPS、EPP、GPO、EPE 均为闭孔结构; EPE 的泡孔大于 GPO、EPP、EPS 的; 在同一面积下, EPS 泡孔数量最多, EPE 泡孔数量最少。对于闭孔泡沫, 泡沫的抗压强度和剪切强度通常随着孔尺寸的增大而降低^[14]。

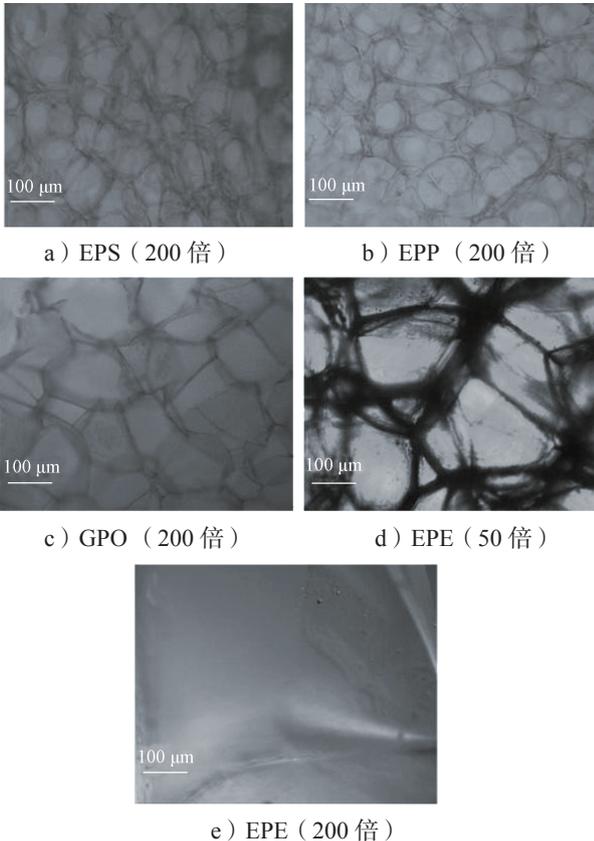


图 2 泡沫材料的微观结构

Fig. 2 Microstructure of foam materials

3.2 静态压缩试验分析

3.2.1 压缩变形性能

厚度缩减率是指试样在一定条件下, 纵向或横向尺寸的变化与原始尺寸的比值, 以 γ 表示, 计算公式如式 (6) 所示^[15-16]。回复率是指试样恢复的厚度与最大压缩量的比值, 计算公式如式 (7) 所示。各试样的指标及计算结果如表 2 所示。

$$\gamma = \frac{T_0 - T_1}{T_0} \times 100\%, \quad (6)$$

$$\eta = \frac{T_1 - (T_0 - T_m)}{T_m} \times 100\%. \quad (7)$$

式中: T_0 为试样的厚度, mm; T_1 为试样压缩后的厚度, mm; T_m 为试验过程中试样的最大压缩量, mm。

表 2 不同试样的压缩变形性能

Table 2 Compression performance of different specimens

试样	试样厚度/mm	最大压缩量/mm	压缩后厚度/mm	厚度缩减率/%	回复率/%
GPO-1	26.0	20.8	15.3	41.2	48.5
GPO-2	26.0	20.8	15.1	42.0	47.5
EPP	26.0	20.8	15.8	39.2	50.9
EPE	26.0	20.8	25.3	2.6	96.6
EPS	26.0	20.8	13.6	47.7	40.3

由表 2 可知, EPE 材料的厚度缩减率最低, 仅为 2.6%, 而 GPO、EPP 和 EPS 材料的厚度缩减率相近, 均在 40% 左右。EPE 材料的回复率最高, 超过了 90%, GPO、EPP 和 EPS 材料的回复率相近, 大约为 40%~50%。因此, 与 EPE 材料相比, GPO、EPP 和 EPS 材料在受到外力作用时, 塑性变形体积更大, 能够更有效地吸收和缓解外力的冲击, 但压缩后的恢复能力不如 EPE。

3.2.2 应力-应变曲线

利用 MATLAB 软件对静态压缩试验得到的载荷-位移数据进行处理, 计算得到应力-应变数据, 数据曲线如图 3 所示。

由图 3 可知, 在测试的变形范围内, GPO 材料的应力-应变曲线在 EPE、EPP 材料应力-应变曲线的上方, 在 EPS 材料的下方, 由此表明在测试变形范围内, GPO 材料的刚度比 EPE、EPP 材料的刚度大, 但不及 EPS 材料的。此外, 图 3 中 GPO 材料静态压缩过程主要分为 3 个阶段: 弹性形变阶段、塑性形变阶段、密实化阶段。在低于 0.06 应变范围内, 材料处于弹性形变阶段, 应力增长较快, 其中 EPS 材料的增速最快, GPO 材料与 EPP 材料的相近,

而EPE材料应力增速较慢;在0.06~0.4应变范围内,处于塑性形变阶段,GPO、EPE、EPP、EPS材料应力的变化趋势基本一致;在0.4~0.8应变范围内,材料处于密实化阶段。

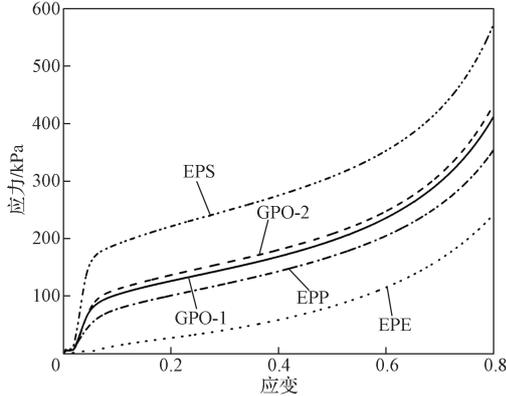
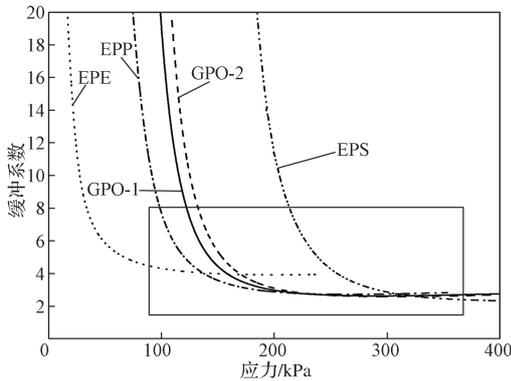


图3 应力-应变曲线

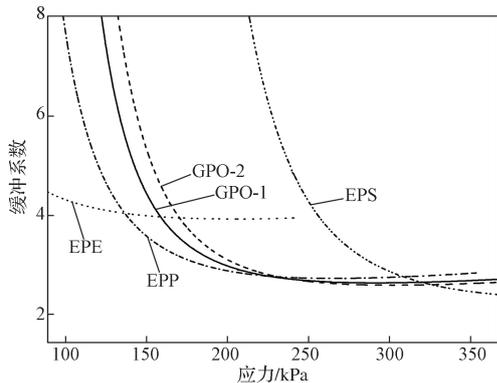
Fig. 3 Stress-strain curves

3.2.3 缓冲系数-最大应力曲线

利用MATLAB软件对静态压缩试验得到的应力-应变数据进行处理,得到缓冲系数-最大应力曲线如图4所示,相关数据如表3所示。



a) 整体曲线图



b) 局部放大图

图4 缓冲系数-最大应力曲线

Fig. 4 Buffer coefficient-maximum stress curve

表3 不同材料的最小缓冲系数及最大应力

Table 3 Minimum buffer coefficient and maximum stress of different materials

材料	最小缓冲系数	最大应力 /kPa
GPO-1	2.63	410.9
GPO-2	2.58	432.0
EPE	3.92	241.2
EPP	2.71	353.3
EPS	2.32	571.6

由图4可知,GPO材料对应的缓冲系数-最大应力曲线在EPP、EPE对应曲线的右边,在EPS对应曲线的左边,处于较大的应力区间。在应力大于320 kPa时,EPS对应的缓冲系数最小,说明当承受大冲击应力时,EPS的缓冲效率最高;当应力处于230~320 kPa时,GPO对应的缓冲系数最小,缓冲效率最高;当应力处于130~180 kPa时,EPP对应的缓冲系数最小,缓冲效率最高;当应力小于130 kPa时,EPE的缓冲系数最小,表现出更好的缓冲性能。结合表3可知,在测试范围内,EPS材料极限缓冲系数最小,最小缓冲系数为2.32,对应的最大应力可达571.6 kPa。

4 应用

为了进一步探究GPO材料与其它泡沫材料(EPS、EPP、EPE)实际应用情况,以某公司新型锂离子蓄电池为研究对象进行缓冲包装设计,并计算缓冲衬垫的面积和厚度。该型号锂电池的最大外形尺寸为51.3 cm × 35.2 cm × 15.8 cm,产品质量为22 kg,许用脆值为70g,确定跌落高度为100 cm。利用式(8)~(9)^[17]及各试样的最小缓冲系数及最大应力数据,计算衬垫厚度、缓冲面积、材料体积,并依据缓冲包装失稳的判据式(10)进行方案设计,结果如表4所示。

$$A_1 = \frac{m[G]}{\sigma_m}, \quad (8)$$

$$T = \frac{CH}{[G]}, \quad (9)$$

$$A_{\min} \geq (1.33T)^2. \quad (10)$$

式中: A_1 为缓冲包装的缓冲衬垫面积, cm^2 ; m 为产品质量, kg ; $[G]$ 为产品脆值, g ; σ_m 为缓冲材料承受的最大应力, MPa ; T 为缓冲包装的缓冲衬垫厚度,

cm; H 为产品装卸过程中的等效跌落高度, cm; A_{\min} 为最小缓冲垫的面积, cm^2 。若局部缓冲衬垫选用 2 个侧衬垫, 则 A_{\min} 为缓冲面积的二分之一; 若局部缓冲衬垫选用 4 个角衬垫, 则 A_{\min} 为缓冲面积的四分之一。

表 4 不同材料最小缓冲系数点对应衬垫参数

Table 4 The minimum buffer factor points for different materials corresponding to the gasket parameters

材料	衬垫厚度/cm	缓冲面积/ cm^2	材料体积/ cm^3	设计方案
GPO-1	3.75	374.7	1405.12	角/侧垫
GPO-2	3.68	356.4	1311.55	角/侧垫
EPE	5.60	638.4	3575.04	角/侧垫
EPP	3.87	435.8	1686.54	角/侧垫
EPS	3.31	269.4	891.71	角/侧垫

根据式(8)~(9)可知, 对缓冲包状进行设计时, 较小的缓冲系数能够获得更小的缓冲衬垫厚度, 而较大的应力能够获得更小的缓冲面积, 使包装件整体尺寸减小, 进一步节约仓储及运输空间。结合表 4 可知, 进行缓冲包装设计时, 使用 EPS 的体积最小, GPO 的次之, 使用 EPE 的体积最大。

5 结论

本研究利用静态压缩试验对 GPO、EPE、EPP、EPS 几种缓冲材料进行了测试, 使用 MATLAB 软件对实验数据进行了处理, 得到了应力-应变曲线及缓冲系数-最大应力曲线, 并进行了实际应用的对比分析, 可得如下结论。

1) GPO 材料相较于 EPE、EPP 材料有更高的刚度, 但略小于 EPS 材料; GPO 材料在承受较大冲击力时具有更优的吸能特性, GPO 材料的刚度随着密度的增加而增强。

2) 在应力大于 320 kPa 时, EPS 材料对应的缓冲系数最小(2.32), 说明当承受大冲击应力时, EPS 材料的缓冲效率最高; 当应力处于 230~320 kPa 时, GPO 材料对应的缓冲系数最小(2.58、2.63), 缓冲效率最高; 当应力处于 130~180 kPa 时, EPP 对应的缓冲系数最小(2.71), 缓冲效率最高; 当应力小于 130 kPa 时, EPE 材料的缓冲系数最小(3.92), 表现出更好的缓冲性能。这一特性使得 GPO 材料更适合应用于重型产品的缓冲包装。

3) 实际应用表明, GPO 材料相较于 EPE、EPP、

EPS 材料, 所需的衬垫厚度和缓冲面积小于 EPE、EPP 材料的, 大于 EPS 材料的。在 230~320 kPa 应力区间使用 GPO 材料, 可以减少缓冲包装体积, 对于储运空间利用和物流包装方案的改进具有重要意义。

参考文献:

- [1] 吴彤彤, 吴金卓, 王 卉, 等. 缓冲包装材料经济性与环境影响评价研究进展 [J]. 包装工程, 2021, 42(9): 17-24.
- [2] 辛丽颖. 缓冲包装材料的应用及发展 [J]. 印刷技术, 2016(10): 42-43.
- [3] 樊泽鹏, 王克俭. 塑料缓冲包装材料的现状与应用 [J]. 塑料包装, 2022, 32(1): 7-11.
- [4] 张山峰, 王敏娜, 王振锋. 一种低碳聚苯乙烯共混 GPO 发泡材料及其制备方法: CN116925475A[P]. 2023-10-24.
- [5] 滑广军, 黄益阳. 叠置组合缓冲衬垫设计算例及数值仿真对比分析 [J]. 包装工程, 2018, 39(11): 77-80.
- [6] 滑广军, 陈 琬, 卢富德, 等. 蜂窝纸板缓冲曲线特征分析 [J]. 包装学报, 2018, 10(1): 1-7.
- [7] 巩 雪, 常 江, 李丹婷. 平板电脑缓冲包装件设计及其力学性能分析 [J]. 包装学报, 2018, 10(4): 28-33.
- [8] 徐博易, 于 蕾, 田 野. 高精密封轴承套杯式缓冲垫性能试验研究 [J]. 包装学报, 2020, 12(2): 64-70.
- [9] 都学飞, 欧阳效卓, 张汪年. EPS 缓冲材料的静态压缩性能的试验研究 [J]. 包装工程, 2012, 33(3): 39-41, 45.
- [10] 陈 磊. EPP 包装材料静态压缩与动态缓冲性能研究 [J]. 今日印刷, 2021(4): 43-47.
- [11] 李志强, 田洋洋, 刘随强. 锂电池运输包装设计与跌落仿真分析 [J]. 包装工程, 2022, 43(21): 137-143.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 包装用缓冲材料静态压缩试验方法: GB/T 8168—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [13] 史 奥, 钱 怡. EPS-BC 瓦楞串联缓冲包装结构试验研究 [J]. 包装与食品机械, 2017, 35(3): 21-24.
- [14] 郭安福, 李剑峰, 李方义, 等. 生物质缓冲包装制品成形工艺优化及其性能研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(9): 178-183.
- [15] 国家标准局. 缓冲包装设计: GB/T 8166—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [16] CHEN Y M, DAS R, BATTLE M. Effects of Cell Size and Cell Wall Thickness Variations on the Strength

of Closed-Cell Foams[J]. International Journal of Engineering Science, 2017, 120: 220-240. 2024-03-01.

[17] 周 繁, 唐少炎, 唐 丛, 等. 一种信息可视化的缓冲包装跌落冲击设计方法和系统: CN117634081A[P].

(责任编辑: 李玉华)

Research on the Buffer Performance of GPO Materials

SHI Yong, LIU Qilong, JIN Aowei, ZHOU Yixin, HUA Guangjun

(College of Packaging and Materials Engineering, University of Hunan Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Grand polystyrene beads (GPO) blended foam is a new type of cushioning packaging material. Taking GPO as the research object, the static compression test was carried out. The experimental data were processed by MATLAB software, and the stress-strain curve and buffer coefficient maximum stress curve were obtained. Based on the minimum buffer coefficient and maximum stress, the buffer pad design of a lithium-ion battery product was carried out, while the design schemes of several buffer materials were compared. The results show that GPO foam material has the best cushioning performance in the stress range of 230~320 kPa, and the minimum cushioning coefficient is about 2.6. GPO material is suitable for the cushioning packaging of heavy products. The research is of great significance to the rational use of storage and transportation space, as well as the improvement in logistics packaging scheme.

Keywords: cushioning material; static compression experiment; buffering coefficient; cushioning packaging