缓冲与隔振

发泡聚丙烯的静态压缩性能

孙德强,史英惠,李国志,金强维,李靖靖,胡昕,李耿

(陕西科技大学,西安 710021)

摘要:目的 以发泡聚丙烯为研究对象,研究厚度和密度对发泡聚丙烯静态压缩性能的影响规律。方法 通 过静态压缩试验,得出不同密度和厚度下的力-位移曲线,进一步处理得到应力-应变曲线、能量吸收效 率曲线以及比吸能、总能量吸收图和抗压强度。通过这些曲线分析密度和厚度对发泡聚丙烯材料静态压 缩性能的影响。结果 密度、厚度不同的发泡聚丙烯材料,其应力-应变曲线的形态基本相同。当厚度一 定时,密度越大,总能量吸收、比吸能及抗压强度也越高。当密度一定时,材料越厚,其总能量吸收越 高、比吸能越低,厚度对密实化应变和抗压强度的影响可忽略。结论 在对缓冲包装进行优化设计时, 为了防止出现过度包装导致资源浪费或欠包装导致被包装物出现损毁等情况,应充分比较泡沫材料的厚 度和密度对缓冲和吸能性能的影响,并根据试验对比结果选择最优方案。

关键词:发泡聚丙烯;静态压缩;厚度;密度

中图分类号:TB484 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2018)23-0075-06 DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.23.013

Static Compression Performance of Expanded Polypropylene Foam

SUN De-qiang, SHI Ying-hui, LI Guo-zhi, JIN Qiang-wei, LI Jing-jing, HU Xin, LI Geng (Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the law of effects of thickness and density on the static compression properties of expanded polypropylene foam as the research object. Through the static compression test, the load-displacement curves of different density and thickness were obtained. Then, the stress-strain curves, the energy absorption efficiency curves, the specific energy absorption (E_s), the total energy absorption (E_a) and the crushing strength were obtained by further processing. The effects of density and thickness on the static compressive properties of expanded polypropylene foam were analyzed by these curves. The shapes of stress-strain curves of expanded polypropylene foam with different density and thickness were basically similar. When the thickness was constant, the total energy absorption increased with the increase of density. When the density was constant, the total energy absorption increased with the increase of density. When the density was constant, the total energy absorption increased with the increase of thickness, and the specific energy absorption decreased with the increase of thickness. But, the effect of thickness on densification strain and crushing strength could be neglected. For the optimal design of buffer packaging, to prevent excessive packaging resulting in waste of resources or lack of packaging resulting in the packaged from being damaged, the effects of thickness and density of foam materials on the cushioning and energy absorbing properties should be fully considered, and then the optimal scheme can be selected according to the comparative test results.

KEY WORDS: expanded polypropylene foam; static compression; thickness; density

收稿日期: 2018-06-04

基金项目:国家自然科学基金(51575327);陕西省教育厅重点实验室及基地项目(16JS014);陕西省教育厅 2014陕西本 科高校专业综合改革试点子项目(陕教高[2014]16号)

作者简介:孙德强(1976—),男,陕西科技大学教授、博导,主要研究方向为多孔材料力学性能测试与仿真、计算机辅助技术与软件开发。

通信作者:李国志(1979—),男,陕西科技大学副教授、硕导,主要研究方向为包装材料结构与系统设计。

发泡聚丙烯泡沫塑料(Expanded Polypropylene, 简称 EPP) 是一种优异的绿色缓冲材料, 具有较小的 相对密度、良好的热稳定性、高温尺寸稳定性、较高 的韧性和冲击强度、优良的微波适应性能以及可降解 性等各种优点,因此在汽车、物流运输、包装、建筑 行业以及电子结构件等行业有着广泛的应用[1]。由于 发泡聚丙烯的生产存在技术难点,即通用聚丙烯的熔 体强度低,在发泡过程中容易因为包裹不住气体而造 成熔体断裂,因此不能发泡或发泡倍率很低,导致加 工发泡聚丙烯的难度较大^[2]。李文翔等研究了发泡聚 丙烯的改性、制备方法以及发泡聚丙烯在实际生活中 的应用,发现 PP(聚丙烯)发泡材料具有良好的机 械性能、优良的环保性能和经济性能等优点,因此具 有极大的应用潜力与广阔的市场前景。李翔等也指出 应该把研究 PP 连续挤出发泡的工艺放在一个重心位 置^[3],因此人们目前将发泡聚丙烯材料的研究重点主 要放在其生产制备技术上,对发泡聚丙烯材料缓冲性 能的研究较少,但塑料材料缓冲性能的研究是物流运 输产品防护理论的研究重点。

霍银磊等研究了泡沫塑料材料的单轴压缩性能、 能量吸收机制,得到了泡沫塑料的性能与结构的关系 以及成型工艺与结构的关系,从而为泡沫塑料性能 的提高和更合理的缓冲设计提供了指导意见^[4];刘强 等采用准静态轴向压缩试验结果和有限元仿真结果 相对比的研究方法对 EPP 泡沫填充对铝蜂窝结构压 缩性能的影响开展了研究。研究表明,利用 EPP 泡 沫填充铝蜂窝,能有效改善铝蜂窝结构的轴向压缩 性能^[5]。刘乘等利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件 对 DY-3 重锤冲击 EPP 缓冲材料的过程进行了模拟仿 真,虽然仿真得到的加速度响应曲线与试验得到的曲 线存在一定误差,但是验证了可以用本构方程与有限 元仿真相结合的方法对发泡聚丙烯进行分析^[6]; Cronin 等对 PP 材料进行了研究,验证了发泡材料优 异的耐冲击性、高能量吸收、绝缘性和耐热性^[7]。Kavi 等人研究了填充有聚苯乙烯闭孔泡沫材料圆形铝管 的能量吸收,结果发现,为了有效填充泡沫,必须考 虑泡沫填料强度和泡沫填料平台载荷的大小,选择合 适的泡沫管组合^[8]。Lee等通过研究3种不同密度EPP 材料的动态力学性能,指出不同密度 EPP 的应变率 敏感性有很大不同^[9]。Liu 等研究了填充有 EPP 泡沫 的铝蜂窝的机械性能,对轴向和横向的压缩性能进行 了分析比较^[10]; Nia 等对填充有聚氨酯泡沫的铝蜂窝 轴向性能进行了研究,结果表明聚氨酯泡沫的填充可 以提高铝蜂窝的平均抗压强度和能量吸收能力,并对 比吸能率(单位质量的能量吸收)有影响^[11]。

包装的目的是吸收被包装物体的动能,使作用于 其上的力保持在某一极限值以下。对于给定的包装, 需要选择密度和厚度合适的泡沫材料,因此,文中拟 研究密度和厚度对发泡聚丙烯泡沫材料缓冲性能的 影响规律。

1 试验

1.1 材料与仪器

将所有发泡聚丙烯材料制作成尺寸为 100 mm× 100 mm,厚度分别为 15,30,45,60,75 mm 的试 样。此外,发泡聚丙烯材料的密度分别为 20,30, 45,60 kg/m³。试验过程中使用的试验设备为微机控 制电子万能试验机(CMT4304)。试验过程中,在发 泡聚丙烯材料试样上下表面分别放置一块钢板,钢板 的尺寸要大于发泡聚丙烯泡沫材料的尺寸,可以保证 发泡聚丙烯泡沫材料试样在试验过程中受压均匀。

1.2 方法

参照 GB/T 8168—2008^[12],在试验开始前,首先 将发泡聚丙烯材料试样放置在相对湿度为 77%,温度 为 22 ℃的环境条件下处理 24 h 以上^[13]。随后在相同 的环境条件下进行静态试验,试验过程中,静态试验 机压板的速度为(12±3) mm/min,压板沿着发泡聚 丙烯材料的厚度方向对试验样品进行载荷施压,在压 缩过程中试验机会自动记录下压缩力以及试样相应 的受压变形量。

2 结果与讨论

2.1 密度对发泡聚丙烯静态压缩性能的影响

2.1.1 应力-应变曲线

基于静态压缩试验过程中获取的压力值和试样变 形数据,通过应力、应变的计算公式,借助 EXCEL 软件对实验所得到的数据进行处理,将力-试样变形数 据转化为应力-应变曲线数据,并用 Origin 软件作图。

密度为 20, 30, 45, 60 kg/m³, 厚度为 30 mm 的发泡聚丙烯泡沫材料的静态压缩试验应变-应力曲 线见图 1。由图 1 可知,发泡聚丙烯泡沫材料的压缩 特性与一般多孔材料相似^[14—15],其应力-应变曲线可 以分为 3 个阶段,即弹性阶段、屈服平台阶段和密实 化阶段。

1)弹性阶段。由图1可知,弹性阶段跨度较小, 4 种不同密度的发泡聚丙烯泡沫材料都有相同的情况。这是因为本实验所用的发泡聚丙烯泡沫材料是闭 孔泡沫材料,在闭孔泡沫中,孔穴棱边可弯曲、延伸 或收缩,而形成孔面的膜则发生延展。当泡沫材料受 到压缩时,首先以线弹性的方式发生变形,超过线弹 性区域后进入屈服平台阶段。

2)屈服平台阶段。弹性阶段到屈服平台阶段的 过程比较平缓,屈服阶段也是应力-应变曲线上较长 的平台阶段。曲线的趋势是随应变增大而升高的,在 这个过程中并没有出现比较明显的初始峰应力值,此 阶段也是泡沫材料吸收能量的主要阶段。

3)密实化阶段。经历过屈服阶段之后,在大的 压缩应变条件下,相对的孔壁压到一起,孔壁材料自 身也受到压缩,因此曲线陡然上升,随之从屈服平台 阶段过渡到密实化阶段。此外,从屈服阶段到密实化 阶段的过程中没有明显的分界点。



Fig.1 Stress-strain curves of the different density

2.1.2 比吸能和总能量吸收图

基于力-位移数据可以得出密度为 20, 30, 45, 60 kg/m³, 厚度为 30 mm 的发泡聚丙烯泡沫的比吸能和总能量吸收图(具体计算方法见式(1)、式(2))。

通过静态试验得到的力-位移曲线,对曲线下方 的区域面积进行积分来计算发泡聚丙烯泡沫材料静 态压缩的总能量吸收。

$$E_{a} = \int_{0}^{1} p dl \tag{1}$$

式中: *E*_a为总能量吸收 (J); *p*为施加在试样上的力 (kN); *l*为压缩位移 (mm)。

比吸能(*E*_s)是总能量吸收与试样质量的比值, 计算方法为总能量吸收除以材料质量,可由式(2) 计算。

$$E_{\rm s} = \frac{E_{\rm a}}{m} \tag{2}$$

式中: E_s 为比吸能 (J/g): m 为材料质量 $(g)_o$

发泡聚丙烯泡沫材料在密实化应变时的总能量 吸收图、比吸能图以及密度对其抗压强度影响的柱状 图分别见图 2—4。发泡聚丙烯泡沫材料的屈服平台 阶段是抗压和能量吸收的主要阶段,密实化应变也是 评估泡沫材料缓冲性能的一个重要参数。从图 2—4 分别可以看出,密度越大,比吸能、总能量吸收和抗 压强度越高。

通过分析厚度相同、密度不同的发泡聚丙烯的相 关实验参数,可以发现,不同密度的聚丙烯材料的应 力-应变曲线具有基本相同的趋势;密度越大,其总 能量吸收和比吸能也逐渐增大;密度越大,其抗压强 度越好。



Fig.3 Specific energy absorption of different density





2.2 厚度对发泡聚丙烯静态压缩性能的影响

2.2.1 应力-应变曲线

为了对比同一密度下厚度不同对发泡聚丙烯材 料静态压缩缓冲性能的影响,选取密度为 60 kg/m³, 厚度分别为 15, 30, 45, 60, 75 mm 的发泡聚丙烯 泡沫材料进行分析。

密度为 60 kg/m³,厚度分别为 15,30,45,60,

75 mm 的发泡聚丙烯泡沫材料的应力-应变曲线见图 5。由图 5 可知,同一密度、不同厚度的应力-应变曲 线在弹性阶段和屈服平台阶段的变化趋势基本一致, 说明厚度差异对发泡聚丙烯静态承载能力及缓冲性 能影响较小;在密实化阶段呈现出分散的趋势,这是 因为泡沫材料的密度不均匀,因此导致了试验数据的 分散。





2.2.2 能量吸收效率曲线

基于 Miltz 及 Evans 等提出的能量吸收率概念, 可以用能量吸收效率和理想吸能效率来分析发泡聚 丙烯泡沫材料的吸能特性^[16]。能量吸收效率 *E* 和理 想吸能效率 *I* 的计算公式见式(3)、式(4)。

$$E = \frac{\int_0^{s_m} \sigma d\varepsilon}{\sigma_m}$$
(3)

$$I = \frac{\int_0^{\varepsilon_m} \sigma \mathrm{d}\varepsilon}{\sigma_m \varepsilon_m} \tag{4}$$

式中: σ 为材料的应力(MPa); m 为图 5 曲线 上的任意一点; σ_m , ε_m 为 m 处的应力、应变; ε 为材 料的应变。

密度为 60 kg/m³,厚度分别为 15, 30, 45, 60, 75 mm 的发泡聚丙烯泡沫材料的能量吸收效率曲线 见图 6。由图 6 可以看出,同一密度,不同厚度的能 量吸收效率曲线显示出了非常相似的趋势,能量吸收 效率曲线先是有一长段的上升直至升到最高点,随后 迅速下降。发泡聚丙烯受到压缩作用时,首先发生弹 性变形,而后发生屈服。由图 5 也可得知,发泡聚丙 烯的屈服平台阶段比较长,因此表现为能量吸收效率 曲线前面有很长一段的上升趋势,此时,实际吸能量 也最接近理想吸能量。随着压缩进入密实化阶段,应 力对应变的变化反应变得强烈,增速也变快,此时, 实际吸能量较理想吸能量差距越来越大,表现为能量 吸收效率曲线快速下降。从图 6 还可得知,厚度从 15 mm 到 75 mm 对应的能量吸收效率值依次为



图 6 个问厚度的应要-能重吸收效率曲线 Fig.6 Stain-energy absorption efficiency curves of different thickness

0.3667, 0.3510, 0.3467, 0.3467, 0.3400, 其中厚度 为 15 mm 的能量吸收效率值最大,表明在该应力处 泡沫的吸能特性最好。

泡沫材料的压缩破坏主要是由于压缩过程中,相 对的孔壁压到一起,孔壁材料自身受到压缩,孔隙空 间被挤掉,压缩变形达到密实化状态。从图7可以看 出,厚度越大,密实化应变数值越大,但是密实化应 变值变化范围较小,因此厚度对密实化应变的影响不 明显。



图 7 厚度对密实化应变的影响 Fig.7 Effect of thickness on densification strain

2.2.3 比吸能和总能量吸收图

密度为 60 kg/m³,厚度分别为 15,30,45,60, 75 mm 的发泡聚丙烯泡沫材料的应变-比吸能、应变-总能量吸收曲线以及厚度对其抗压强度的影响(具体 计算方法见式(1-2))见图 8-10。从图 8 可以看 出,同一应变条件下,厚度越大,发泡聚丙烯的总能 量吸收越多,而图 9 的应变-比吸能曲线变化则刚刚 相反,相同的应变条件下,厚度越厚,比吸能数值越 小。这是因为密度大导致泡沫质量增加,进而使得发 泡聚丙烯材料单位质量吸收的能量减少,因此发泡聚 丙烯的比吸能数值和总能量吸收所呈现的趋势相反。 从图 8 还可看出,同一应变条件下,厚度为 75 mm 的样品材料总能量吸收最大。这说明在密度和加载速 度相同的条件下,材料越厚,变形空间越大,进而可 以吸收更多的能量。从图 10 可以看出,5 种不同厚 度的泡沫材料之间的抗压强度变化很小,表明厚度对 抗压强度的影响不明显。



图 8 厚度对总能量吸收的影响 Fig.8 Effect of thickness on total energy absorption



图 9 不同厚度的比吸能 Fig.9 Specific energy absorption of different thickness





3 结语

文中主要分析了静态压缩条件下密度和厚度对 发泡聚丙烯能量吸收的影响。通过静态压缩试验得到 力和位移数据,通过处理,得到应力-应变曲线、能 量吸收效率曲线、应变-比吸能、应变-总能量吸收图 以及密度和厚度对其抗压强度的影响柱状图,并分析 了以上曲线得出下列结论。

1)密度、厚度不同的发泡聚丙烯材料的应力-应 变曲线具有基本相同的趋势,且与一般多孔材料的压 缩特征相似,都可以分为3个阶段,即弹性阶段、屈 服平台阶段和密实化阶段。

2)材料厚度一定时,密度越大,总能量吸收、 比吸能和抗压强度也越高。

3)材料密度一定时,材料越厚,总能量吸收越高,比吸能越低,厚度对密实化应变和抗压强度的影响可忽略。

综上,在一定的静态压缩条件范围内,对于每种 缓冲材料,都有一个最佳的厚度和密度范围。在对缓 冲包装进行优化设计时,为了防止出现过度包装导致 资源浪费或欠包装导致被包装物损毁等情况,应充分 比较泡沫材料的厚度和密度的缓冲和吸能性能,根据 对比结果选择出最优方案。

参考文献:

- 李超, 游峰, 王大威, 等. 发泡聚丙烯制备与应用研究进展[J]. 高分子通报, 2015(5): 36—42.
 LI Chao, YOU Feng, WANG Da-wei, et al. Preparation and Application of Expanded Polypropylene Foam[J]. Polymer Bulletin, 2015(5): 36—42.
- [2] 张泉. 发泡聚丙烯生产技术与市场分析[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(4): 20-23.
 ZHANG Quan. Production Technology and Market Analysis of Foamed Polypropylene[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment (Plastics), 2016, 42(4): 20-23.
- [3] 李文翔,张洋,张思思,等.发泡聚丙烯改性与制备研究进展[J].胶体与聚合物,2017(1):45-48.
 LI Wen-xiang, ZHANG Yang, ZHANG Si-si, et al. Research Progress of Polypropylene Foam[J]. Chinese Journal of Colloid & Polymer, 2017(1):45-48.
- [4] 霍银磊. 低密度泡沫塑料的结构及其力学行为研究
 [D]. 无锡: 江南大学, 2008.
 HUO Yin-lei. The Study of Structure and Mechanics Behavior of Low Density Foamed Plastic[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [5] 刘强, 陈航. EPP 泡沫填充对铝蜂窝压缩性能的影响 研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(3): 49—52.
 LIU Qiang, CHEN Hang. Experimental and Numerical Investigation in to the Compression Characteristics of Aluminum Honeycomb Panel Filled With EPP[J]. Fi-

ber Reinforced Plastics/Composites, 2017(3): 49-52.

- [6] 刘乘,刘勋,沈训乐.发泡聚丙烯本构模型在冲击试验仿真中的应用[J].包装工程,2012,33(15):40—47.
 LIU Cheng, LIU Xun, SHEN Xun-le. Application of EPP Constitutive Model in Impact Test Simulation[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15):40—47.
- [7] CRONIN D S, OUELLET S. Low Density Polyethylene, Expanded Polystyrene and Expanded Polypropylene: Strain Rate and Size Effects on Mechanical Properties[J]. Polymer Testing, 2016, 53: 40—50.
- [8] KAVI H, TOKSOY A K, GUDEN M. Predicting Energy Absorption in a Foam-filled Thin-walled Aluminum Tube Based on Experimentally Determined Strengthening Coefficient[J]. Materials & Design, 2006, 27(4): 263—269.
- [9] LEE Y S, PARK N H, YOON H S. Dynamic Mechanical Characteristics of Expanded Polypropylene Foams [J]. Journal of Cellular Plastics, 2010, 46(1): 43—55.
- [10] LIU Q, FU J, MA J, et al. Axial and Lateral Crushing Responses of Aluminum Honeycombs Filled with EPP Foam[J]. Composites Part B Engineering, 2017, 130: 236—247.
- [11] NIA A A, SADEGHI M Z. The Effects of Foam Filling

on Compressive Response of Hexagonal Cell Aluminum Honeycombs Under Axial Loading-experimental Study[J]. Materials & Design, 2010, 31(3): 1216— 1230.

- [12] GB/T 8168—2008, 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S].
 GB/T 8168—2008, Testing Method of Static Compres-
- sion for Package Cushioning Package Materials[S].
 [13] 彭国勋.物流运输包装设计[M].北京:印刷工业出版社, 2013.
 PENG Guo-xun. Logistics Transportation Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2013.
- [14] GHAMARIAN A, ABADI M T. Axial Crushing Analysis of End-capped Circular Tubes[J]. Thin-walled Structures, 2011, 49(6): 743—752.
- [15] NIA A A, SADEGHI M Z. An Experimental Investigation on the Effect of Strain Rate on the Behaviour of Bare and Foam-filled Aluminium Honeycombs[J]. Materials & Design, 2013, 52(24): 748-756.
- [16] MILTZ J, GRUENBAUM G. Evaluation of Cushion Properties of Plastic Foams Compressive Measurements[J]. Polymer Engineering & Science, 1981, 21(15): 1010–1014.