

耐高温聚酰亚胺泡沫缓冲材料静态压缩性能研究

武英英, 许恒庭, 沈燕萍, 曹雪峰

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

摘要: **目的** 模拟缓冲包装材料在航天产品运输过程中的使用情况。**方法** 对比并研究了常态及经过高低温循环处理的聚酰亚胺泡沫缓冲材料,在预压缩处理前后力学性能和回弹性能变化。**结果** 经过预压缩处理后,常态和高低温循环处理的聚酰亚胺泡沫件回弹量分别为 97.15%、96.73%。2组静态压缩试验中,未预压处理的聚酰亚胺泡沫静态压缩恒载荷存储后,常态与高低温循环处理试件的残余形变分别为 8.83%、9.86%;预压缩处理后的泡沫经过恒形变存储后,残余形变分别为 3.69%、4.78%,与未预压试件相比,残余形变分别减少了 5.14%、5.08%。**结论** 高低温交变并未对泡沫回弹情况产生较大影响,有无预压缩 2组试件分别呈现不同的回弹性能,经过预压处理,聚酰亚胺泡沫泡孔结构残余形变适当,聚酰亚胺泡沫结构更加紧密,材质变硬,其承受载荷能力更强,受力后回复性更好。

关键词: 缓冲材料; 聚酰亚胺; 高低温循环; 静态压缩

中图分类号: TB485.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2014)01-0064-05

Static Compression of Thermal Resistant Polyimide Foam Cushion Material

WU Ying-ying, XU Heng-ting, SHEN Yan-ping, CAO Xue-feng

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

ABSTRACT: **Objective** The aim of the test was to simulate the use status of cushion package material during the transportation of aerospace products. **Methods** The mechanics and rebound performance of the normal and high-low-temperature cycled polyimide foam were investigated and compared with preloading and no preloading samples. **Results** After treated with preloading, the springback amount of the normal and high-low-temperature cycled polyimide foam pieces was 97.15% and 96.73%, respectively; for the two groups of static compression test, after storage under static compression and constant load, the polyimide foam without preloading treatment showed residual deformation of 8.83% and 9.86% after normal and high-low temperature circulation processing, while the residual deformation after constant deformation storage was 3.69% and 4.78% for the foam cushion subjected to pre-compression processing, which was decreased by 5.14% and 5.08% compared with the specimens without preloading. **Conclusion** High and low temperature alternation did not largely influence the springback situation of the specimens; the two groups of specimens with or without preloading presented different resilience, after preloading process, the polyimide foam pore structure showed proper residual deformation, resulting in more compact structure of polyimide foam, which hardened the material, and increased the load bearing ability, therefore, the resilience was better.

KEY WORDS: cushion material; polyimide; high-low temperature cycling; static compression

缓冲材料与产品直接接触可以起到减震作用,它的性能直接影响到包装材料对产品的保护^[1]。作为新型泡沫材料的代表,聚酰亚胺泡沫材料因其具有质轻、阻燃、耐辐射、环保、防震等优良特性,在航空航

天、电子电器及信息产业领域里得到越来越多的关注^[2-8]。航天产品在运输及保存过程中,还要求缓冲包装材料具有良好的热稳定性和尺寸稳定性,能够耐受冷热交变的考验,在变化环境中保持性能稳定,以

保障产品质量的可靠性、安全性,延长贮存寿命^[9]。

通过对常态及经高低温交变循环处理的聚酰亚胺泡沫材料进行不同的静态压缩试验,来模拟缓冲材料在实际使用过程中的情况,并对2种状态的聚酰亚胺泡沫材料在预压缩前后表现出的力学性能和回弹量变化进行了讨论。

1 试验

1.1 样品

试验样品选用聚酰亚胺泡沫材料 SOLIMIDE[®] AC-550H,德国 Evonik 公司生产,密度为 0.51 g/cm³,泡沫微孔尺寸为 0.138 mm,试样尺寸为 100 mm×100 mm×原材料厚度,数量为 12 组,实验开始前样品已经在温度为 25 ℃,相对湿度为 55% 的环境中放置 24 h 以上。

1.2 设备

试验设备选用 GDS-150 HASUC 高低温交变试验箱、WDW-100 电子万能试验机(最大负荷为 2 kN,准确度等级为 1 级)。采用电脑软件同步采集数据,试验用品还有游标卡尺、金属垫片、砝码。

1.3 方法

1) 将试样分为 2 组,并进行编号,分别为常态 A1 组、A2 组,高低温循环处理 B1 组、B2 组,试样编号及安排见表 1。

2) 将 B1 组、B2 组泡沫件放入高低温交变循环试验箱,设置高低温范围为±100 ℃,到达温度上下限后分别停留 2 min,温度变化速率为 40 ℃/min,循环处理 1000 次,从试验箱取出后在恒温湿环境中放置 24 h 以上。

3) 每个试样不同边位的初始厚度测量 4 组,并取平均值。

4) 预压缩处理。用电子万能试验机对 A1 组、B1 组试样以速度为 5 mm/min 进行预压试验,共压缩 6 次。前 5 次压缩形变为 25%,每次压缩后缓慢释放,间隔 10 min,测量泡沫回弹厚度,再进行下一次压缩。第 6 次压缩泡沫试样至形变 65% 处,释放后,15 min 后再次测量泡沫回弹厚度,读取载荷-时间曲线,并估算出试样形变 25% 所需的平均载荷 F 。

5) 静态存储试验。采用恒定形变或恒定负荷,

在低于材料屈服极限内,使泡沫材料经受交变的应力或形变,观察泡沫厚度变化率和回弹量的变化^[10-13]。

a. 恒形变存储。将经过步骤 4 预压缩处理的 A1 组、B1 组各试件再次压缩至形变 25% 处,持续压载 24 h,释放后 30 min 测量泡沫试件的回弹情况。在试验过程中记录压载载荷衰减情况,并读取载荷-时间曲线,而后进行分析。

b. 恒载荷存储。将 A2、B2 组试验件,不经过预压缩处理,直接用砝码施以压载载荷 F ,压载时间为 24 h,存储过程中记录泡沫厚度衰减情况,即试件厚度-时间曲线,释放 30 min 后再次观察泡沫回弹情况,计算泡沫回弹量和残余应变。

表 1 试样编号及试验安排

Tab.1 Sample number and test schedule

编号	数量	状态	试验件尺寸	试验顺序
A1	3	常态	100 mm×100 mm× 原材料厚度	①预压缩 ②恒形变存储
A2	3	常态	100 mm×100 mm× 原材料厚度	①恒载荷存储
B1	3	高低温	100 mm×100 mm× 原材料厚度	①预压缩 ②恒形变存储
B2	3	高低温	100 mm×100 mm× 原材料厚度	①恒载荷存储

2 试验结果和分析

根据试验方法中 3-5 步描述,分别记录试件初始状态以及不同条件下压缩状态,对比试验初始状态、预压试验后以及存储试验后泡沫试件状态变化,得到试件试验过程中形变、回弹量等各项压缩性能参数,并通过回弹量和残余形变变化对各组试件加以分析。

2.1 试件初始厚度测量和预压缩处理后数据

试件初始原度测量和预压缩处理后的数据见表 2 和表 3。

表 2 A1、B1 试样初始厚度

Tab.2 Initial thickness of samples A1 and B1

	A1 试样初始厚度			B1 试样初始厚度		
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]
n_1	19.14	18.86	19.10	18.1	19.16	18.44
n_2	19.16	18.82	19.08	18.02	19.14	18.38
n_3	19.12	18.84	19.10	18.2	19.14	18.36
n_4	19.12	18.82	19.12	18.1	19.14	18.48
\bar{N}	19.14	18.84	19.10	18.11	19.15	18.42

表3 A1, B1 试样预压缩处理后厚度

Tab.3 Thickness of samples A1 and B1 after preloading

	mm					
	A1 组预压缩处理后厚度			B1 组预压缩处理后厚度		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#
h_1	19.11	18.42	18.95	17.76	18.73	18.35
h_2	19.01	18.31	18.65	17.76	18.78	17.86
h_3	18.88	18.21	18.6	17.64	18.64	17.78
h_4	18.79	18.09	18.6	17.56	18.54	17.73
h_5	18.73	17.99	18.52	17.55	18.49	17.77
h_6	18.06	17.76	18.05	16.85	18.07	17.31
\bar{H}	18.76	17.13	18.56	17.52	18.54	17.8

经过测量计算 A1 组、B1 组试样预压缩后回弹情况见表 4。

表4 A1, B1 试样回弹量

Tab.4 Rebound value of samples A1 and B1

	%					
	A1 组			B1 组		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#
试件回弹量	98.03	96.23	97.18	96.74	96.82	96.63
平均回弹量	97.15			96.73		

2.2 存储试验曲线与数据

2.2.1 恒形变存储

经过预压缩处理的泡沫试件, 预压缩处理结束后在恒温湿度环境中放置 24 h, 再进行形变 25% 的恒形变存储, 存储时间为 24 h, 存储载荷-时间曲线见图 1—2。

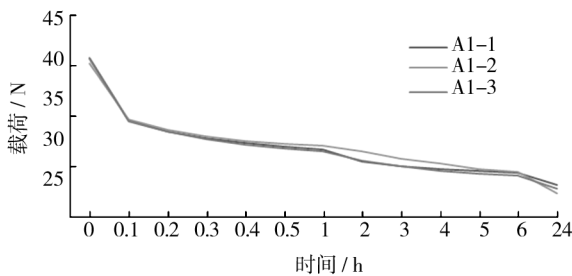


图1 A1 组载荷-时间曲线

Fig.1 Load-time curve of A1

恒形变存储结束后, 30 min 后测量泡沫试件回弹量, 2 组测量结果见表 5。

2.2.2 恒载荷存储

试验过程中的 A2 组和 B2 组试件厚度-时间变化见图 3 和图 4。

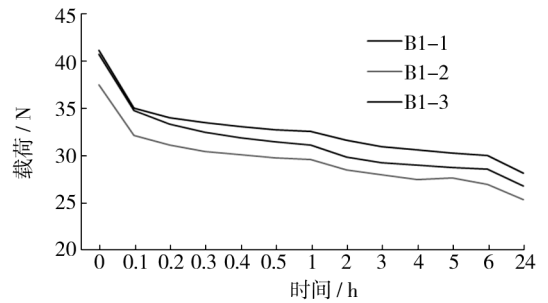


图2 B1 组载荷-时间曲线

Fig.2 Load-time curve of B1

表5 A1, B1 组恒形变存储前后回弹量

Tab.5 Rebound value of A1 and B1 after steady-deformation storage

	A1 组恒力位移存储			B1 组恒力位移存储		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#
试件压缩前平均厚度/mm	18.09	18.22	18.49	18.09	18.27	18.8
恒形变存储恢复后厚度/mm	17.4	17.52	17.86	17.16	17.66	17.7
形变回弹量/%	96.19	96.16	96.59	94.86	96.66	94.15
平均回弹量/%	96.31			95.22		

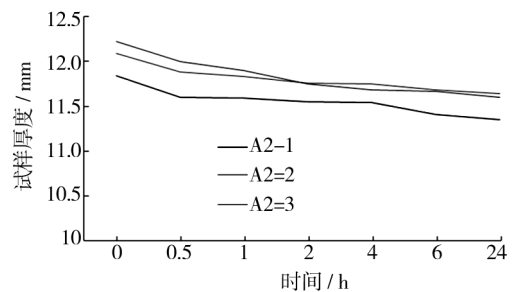


图3 A2 组试样厚度-时间曲线

Fig.3 Thickness-time curve of A2

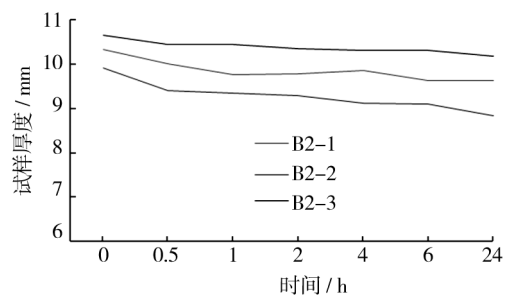


图4 B2 组试样厚度-时间曲线

Fig.4 Thickness-time curve of B2

恒载荷存储结束后,测得聚酰亚胺泡沫试件回弹量见表6。

表6 A2,B2 组恒载荷存储前后回弹量

Tab.6 Rebound value of A1 and B1 after steady-load storage

	A2 组恒力存储			B2 组恒力存储		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#
试件初始平均厚度/mm	18.73	18.5	18.49	18.74	18.5	18.45
恒载荷存储恢复后厚度/mm	17	16.98	16.82	16.82	16.7	16.68
形变回弹量/%	90.76	91.78	90.97	89.75	90.27	90.41
平均回弹量/%	91.17		90.14			

试验用泡沫试件属于同一批次产品,试件 A1,B1 组压缩前平均初始厚度分别为 19.03,18.56 mm。经过预压缩处理后,常态和高低温循环处理的聚酰亚胺泡沫试件回弹量分别为 97.15%,96.73%,泡沫试件高低温循环处理后与常态试件相比回弹量基本相当,高低温交替并未对泡沫回弹情况产生较大影响。2 组静态压缩试验:未经预压缩处理的聚酰亚胺泡沫静态压缩恒载荷存储后,常态与高低温循环处理试件的残余形变分别为 8.83%,9.86%;经过预压缩处理的 2 组聚酰亚胺泡沫厚度损失率为 2.85%,3.27%,预压缩处理后的泡沫经过恒位移存储后残余形变为 3.69%,4.78%,与未预压缩的泡沫件相比,残余形变减少 5.14%,5.08%。有无预压缩,使得 2 组试件分别呈现不同的回弹性能,经过预压缩处理,聚酰亚胺泡沫泡孔结构残余形变适当,使得聚酰亚胺泡沫结构更加紧密,材质变硬,其承受载荷能力更强,受力后回复性更好。

3 讨论

聚酰亚胺泡沫材料经过高低温循环处理后,实验数据显示材料缓冲能力及力学性能并未发生很大改变。这是因为聚酰亚胺泡沫属于芳香族聚合物,其大分子链含有酰亚胺基,该芳杂环结构单元极性较强,化学键稳定,具有较强的刚性。同时聚酰亚胺泡沫材料也是聚合物中热稳定性最好的材料之一^[14-15],不仅耐高温,而且耐低温,能够在温度不断变化的环境中保持性能稳定。

经过预压缩试验的静态压缩试验相比于未经预

压处理的静态压缩试验,前者泡沫压缩后回弹量好于后者。由于预压缩对材料的结构、大小、数量等均产生影响,会产生不同的永久变形率,所以在静态压缩试验中呈现不同的缓冲性能。聚酰亚胺泡沫材料本身不能呈现良好的缓冲性能,在静态压缩前对泡沫经过适当预先压缩处理,使其在有效缓冲范围内变形,具有良好的吸能效果,从而实现对产品的缓冲防护。

4 结语

聚酰亚胺泡沫作为航天产品运输过程中的缓冲材料,要经受不同运输环境及长时间运输路程的考验,并且在投入使用时会因产品质量和体积等因素受到不同程度的挤压,产生一定形变,从而导致材料的缓冲性能和力学性能均发生变化。产品设计时对缓冲材料进行预先高低温循环处理和预先压缩处理使变形在可控范围内,方可设计出可靠的产品包装,实现产品运输、存储安全防护。

参考文献:

- [1] 杨延梅,朱大鹏. 运输包装学[M]. 成都:西南交通大学出版社,2010:116—121.
YANG Yan-mei, ZHU Da-peng. Transport Packaging[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010: 116—121.
- [2] SHIMIZU K. Optical Trans-body Imaging: Feasibility of Non Invasiion CT and Functional Imaging of Living Body[J]. Jpn J of Medicine Philosophical, 1992(11): 620—629.
- [3] 赵飞明,徐永祥. 聚酰亚胺泡沫材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2002(3): 6—7.
ZHAO Fei-ming, XU Yong-xiang. Research of Polyimide Foam[J]. Aerospace Materials & Technology, 2002(3): 6—7.
- [4] HEDRICK L, CHARLIER Y, DIPIETRO R A, et al. High T-G Polyimide Nanofoams Derived from Pyromellitic Dianhydride and 1,1-bis(4-Aminophenyl)-1-Phenyl-2,2,2-Trifluoroethane[J]. Polym Sci, Polym Chem Ed, 1996, 34: 28.
- [5] FODOR J S, BRIBER R M, RUSSELL T P, et al. Non-uniform Composition Profiles in Thin Film Polymeric Nanofoams[J]. Polym Prepr, 1999, 40(10): 2547—2553.
- [6] HERMANN S. Applications for PMI Foams in Aerospace Sandwich Structures[J]. Reinforced Plastics, 2006(1): 44.
- [7] SERVATY S, GEYER W, NORBERT R, et al. Method for Producing Block-shaped Polymethacrylimide Foamed Materials; US, 6670405[P]. 2003-12-30.

- [8] 邱莎莎,蔡建. 导弹缓冲包装设计选材[J]. 包装工程, 2011,32(9):44—45.
QIU Sha-sha, CAI Jian. Missile Cushion Packaging Design and Material Selection[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(9):44—45.
- [9] 齐锴亮. 聚酰亚胺泡沫塑料的研究进展[J]. 材料导报, 2011,25(4):67—68.
QI Kai-liang. Research Progress of Polyimide Foam[J]. Materials Review, 2011, 25(4):67—68.
- [10] 李书印. 发泡包装材料缓冲特性研究[J]. 包装工程, 1998,19(6):1—2.
LI Shu-yin. Studying of Cushioning Character of Expanded Packaging[J]. Packaging Engineering, 1998, 19(6):1—2.
- [11] 刘乘. 任亚东. 几种常用缓冲材料性能研究[J]. 包装工程, 2010,31(7):117—118.
LIU Cheng, REN Ya-dong. Research on Properties of Several Cushion Material[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7):117—118.
- [12] 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 Comparison Between EPO, EPS and EPE Foam[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19):10—12.
- [13] 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):40—45.
DU Xue-fei, OUYANG Xiao-zhuo, ZHANG Wang-nian. Experimental Research on Static Compression Properties of EPS Buffer Material[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(3):40—45.
- [14] 贺海龙, 李玲, 王琦玲. 聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫材料的研究进展[J]. 化学中间体, 2011(10):23—24.
HE Hai-long, LI Ling, WANG Qi-ling. Research on the Polymethacrylimide Foam[J]. Chemical Intermediates, 2011(10):23—24.
- [15] HERMAIN S. PMI Foam Rigid Plastics[J]. Kunststoffe, 1999,4:32—33.

(上接第 37 页)

- [14] 于江, 马庭瑞. HS-GC/MS 法检测食品塑料包装中的挥发性有机物[J]. 包装工程, 2009,30(6):30—31.
YU Jiang, MA Ting-rui. Determination of VOCs in the Plastic Food Package by HS-GC/MS[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(6):30—31.
- [15] 王晓宇, 银铃, 刘友平. 包装材料与枸杞子饮片中挥发性有机物的顶空气相色谱比较[J]. 中国实验方剂学杂志, 2013,19(4):18—22.
WANG Xiao-yu, YIN Ling, LIU You-ping. Head-space Gas Chromatography Comparison of Volatile Organic Compounds from Packing Materials and Packaged Lycium Barbarum Pieces[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2013, 19(4):18—22.
- [16] 刘春波, 刘志华, 孙志勇, 等. 动态顶空-气相色谱法分析食品包装材料中的 VOCs[J]. 现代科学仪器, 2010(4):87—89.
LIU Chun-bo, LIU Zhi-hua, SUN Zhi-yong, et al. Analysis of Volatile Organic Compounds in Food Packing Material by Purge & Trap-Gas Chromatography[J]. Modern Scientific Instruments, 2010(4):87—89.

(上接第 63 页)

- [12] LINDER W. New Developments for In-can Preservation of Water-based Paints and Printing Inks[J]. Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions, 2001, 84(B2):91—168.
- [13] 张心亚, 魏霞, 陈焕钦. 水性涂料的最新研究进展[J]. 涂料工业, 2009(12):17—23.
ZHANG Xin-ya, WEI Xia, CHEN Huan-qin. The Latest Research Progress in Waterborne Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2009(12):17—23.
- [14] 李丹, 梁亮, 蒋晨, 等. 环境友好型水性涂料复合膜防腐性能的研究[J]. 涂料工业, 2010(8):48—51.
LI Dan, LIANG Liang, JIANG Chen, et al. Study on Anticorrosion Performance of Environment Friendly Water-based Multiple Coatings[J]. Paint&Coatings Industry, 2010(8):48—51.
- [15] 赵德平, 魏先福, 黄蓓青, 等. 影响水性光油耐划伤性的因素[J]. 包装工程, 2010,31(17):132—134.
ZHAO De-ping, WEI Xian-fu, HUANG Bei-qing, et al. Influencing Factors on the Scratch Resistance of Water Soluble Varnish[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(17):132—134.
- [16] 蔡训儒, 张浩, 徐卫兵, 等. 高分子乳化剂的合成及其在水性上光油中的应用研究[J]. 包装工程, 2011,32(7):73—76.
CAI Xun-ru, ZHANG Hao, XU Wei-bing, et al. Synthesis of Polymer Emulsifier and Its Application in Waterborne Varnish[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7):73—76.