

# 某型硬质泡沫弹架蠕变特性及贮存寿命研究

秦玉灵<sup>1</sup>, 宫晓春<sup>2</sup>, 李晓东<sup>1</sup>, 王巨民<sup>1</sup>, 渠弘毅<sup>1</sup>

(1.北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076; 2.北京强度环境研究所, 北京 100076)

**摘要:** **目的** 研究一类硬质泡沫弹架结构的蠕变特性和贮存寿命评估方法。**方法** 通过测定贮存恒定应力水平下该型硬质泡沫弹架的温度加速蠕变性能数据, 建立泡沫弹架材料的蠕变本构关系, 研究泡沫弹架材料的蠕变时温等效规律。在此基础上, 开展泡沫弹架的高温加速贮存试验与评估方法研究。**结果** 在高温蠕变试验后, 该型硬质泡沫材料的本构关系及压缩特性均未发生明显变化, 蠕变特性是影响硬质泡沫材料长贮失效关键敏感因素。**结论** 根据时温等效原理和 WLF 方程, 设计并开展了硬质泡沫弹架的加速贮存试验, 研究成果为系统级弹架结构的贮存寿命评定与延寿研究提供技术支持。

**关键词:** 硬质泡沫弹架; 蠕变特性; 本构关系; 时温等效; 加速贮存

中图分类号: TJ089

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)04-0022-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.04.004

## Creep Properties and Accelerated Storage Test Method of Rigid Foam Cartridge

QIN Yu-ling<sup>1</sup>, GONG Xiao-chun<sup>2</sup>, LI Xiao-dong<sup>1</sup>, WANG Ju-min<sup>1</sup>, QU Hong-yi<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China;

2. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT:** The creep characteristics and the evaluation method of storage life to rigid foams were researched in this paper. The creep constitutive relation of the foam bombardment materials was established based on the creep performance data by measuring the rigid foam bombs at a constant temperature stress level. Then the temperature-time equivalent theory and the high temperature accelerated storage test method of the foam shells were studied. The creep constitutive relation and the compressive parameter of the rigid foam made no evident change after the high temperature creep test. The creep characteristics were the key sensitive factors affecting the long-term storage failure of rigid foams. The accelerated storage method of the rigid foam cartridge based on the temperature-time equivalent theory and the WLF equation was worked out to support the storage life assessment and life extension research of the entire cartridge structure.

**KEY WORDS:** rigid foam cartridge; creep characteristics; constitutive relation; temperature-time equivalent; accelerated storage

武器系统的贮存可靠性指武器在规定的贮存条件(即经历的运输、装卸、库房贮存、战备值班等各种

贮存状态下的环境条件)下和贮存时间内, 保持规定的功能的能力<sup>[1-2]</sup>。早在 20 世纪 80 年代, 美国就系统

收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-02-27

Received: 2021-12-20; Revised: 2022-02-27

基金项目: 国防基础科研项目(11172046)

Fund: The National Defense Basic Research Project(11172046)

作者简介: 秦玉灵(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为环境强度设计技术。

Biography: QIN Yu-ling(1982—), Female, Doctor, Senior engineer, Research focus: environmental and Strength design technology.

引文格式: 秦玉灵, 宫晓春, 李晓东, 等. 某型硬质泡沫弹架蠕变特性及贮存寿命研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 022-027.

QIN Yu-ling, GONG Xiao-chun, LI Xiao-dong, et al. Creep Properties and Accelerated Storage Test Method of Rigid Foam Cartridge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 022-027.

开展了武器贮存的可靠性研究, 并提出了几类产品在实际贮存和加速贮存条件下的可靠性试验数据和寿命预示方法。俄罗斯“火炬”设计局开发的导弹系统及整弹级加速贮存试验方法, 可以通过 6 个月的实验室加速试验, 模拟导弹 10 a 的贮存寿命。我国武器系统的贮存寿命评估和延寿研究方法是通过对已贮存若干年的装备进行抽检、测试、分解、解剖, 然后进行理化分析及例行试验, 将分析及试验结果与设计指标进行对比, 用工程方法判断装备延寿年限, 而在系统级产品的贮存寿命评定和延寿技术领域的研究成果较少<sup>[3-7]</sup>。

本文对武器系统常用的硬质泡沫弹架蠕变特性进行研究, 通过测定贮存恒定应力水平下硬质泡沫弹架的温度加速蠕变性能数据, 建立泡沫弹架材料的蠕变本构关系, 研究泡沫弹架材料的蠕变时温等效规律。在此基础上, 开展泡沫弹架的高温加速贮存试验与评估方法研究, 为武器系统的系统级贮存寿命评定与延寿研究提供技术支撑和依据。

### 1 硬质泡沫弹架蠕变特性研究

硬质泡沫是一种聚氨酯泡沫塑料, 其长贮失效机理取决于材料的本身特性, 主要体现在老化和蠕变 2 方面。从前期研究结果<sup>[8-12]</sup>和最新部队返回的数据分析, 泡沫弹架的贮存环境较好, 不会长期暴露于日照、光线和极端温度环境之中, 硬质泡沫塑料的抗老化性能相对良好。因此, 老化问题不是影响泡沫弹架贮存寿命的主要因素, 蠕变性能是影响其贮存寿命的关键指标。硬质泡沫材料的蠕变性能是影响泡沫弹架贮存

寿命的关键性指标, 而硬质泡沫材料的蠕变性能对温度应力十分敏感, 温度的升高会加速材料蠕变的速率, 因此硬质泡沫塑料的贮存敏感应力为温度应力。

硬质泡沫材料蠕变特性测量试验在高温电子持久蠕变试验机内进行, 对硬质泡沫材料施加恒定压缩应力的同时, 进行高温应力加速, 蠕变试验机实时测量得到不同温度及载荷下试件的变形。为保证试验结果的准确性和代表性, 所有参试硬质泡沫塑料样件均为新加工的同规格、同型号的合格弹架产品的本体解剖件, 其制造、组装等各工艺环节均保持一致, 以尽量降低产品之间的差异性。蠕变特性测量试验的加载及安装如图 1 所示<sup>[13]</sup>。

选取 4 个试验温度 (60、80、100、120 °C)、每个温度下选取 3 个样件进行试验, 试验测得的压缩蠕变随时间变化曲线如图 2 所示。可以看出, 硬质泡

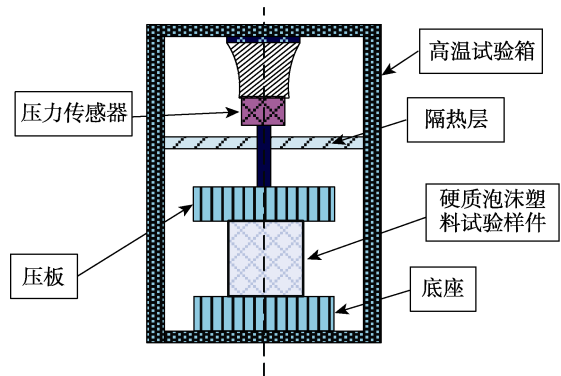


图 1 硬质泡沫材料试验加载及安装  
Fig.1 Schematic diagram of foam specimen testing device

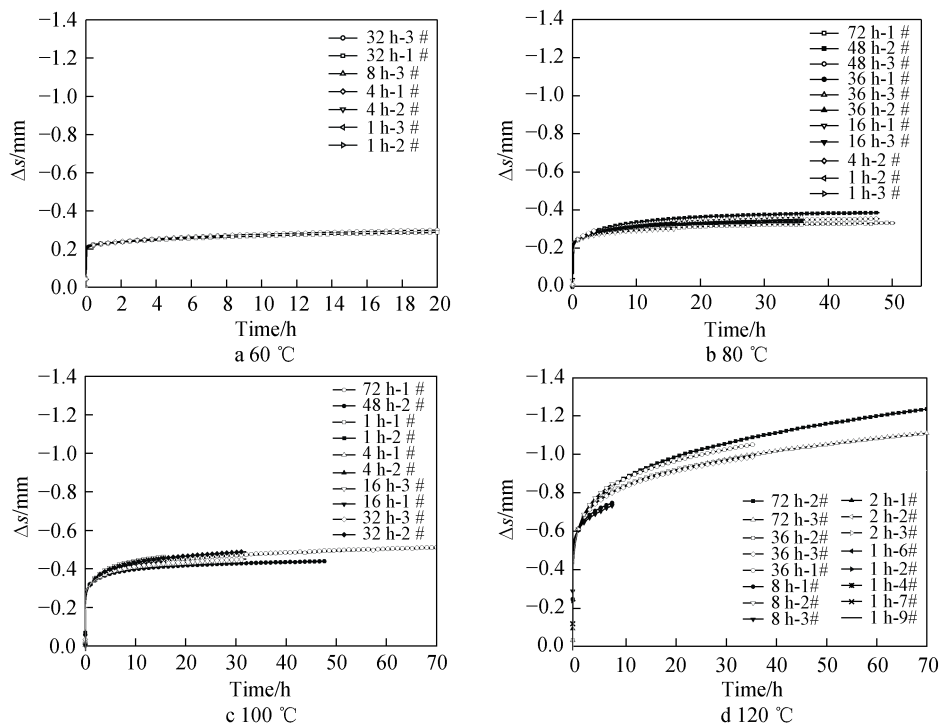


图 2 各温度下硬质泡沫材料的蠕变曲线  
Fig.2 Normalized creep curve at different temperatures

沫材料的蠕变量随着温度的升高呈现逐渐增大的整体趋势。在每一个温度条件下，初始阶段的蠕变速率很大，随着时间延长，蠕变速率逐渐减小，最终会达到一个极小值。

## 2 硬质泡沫材料的本构关系及压缩特性研究

### 2.1 本构关系研究

硬质泡沫塑料弹架的本构关系方程<sup>[13]</sup>可以表示为：

$$\sigma = \psi(\varepsilon) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \varepsilon^i \quad (1)$$

对不同温度下泡沫塑料的载荷-位移曲线向  $\sigma-\varepsilon$  关系进行转化，然后进行非线性拟合，可得到式(1)中系数  $A_i$  的值，见表1。将表1数据代入本构关系方程(1)可知，经历不同温度的高温压缩蠕变试验后，各试件本构关系在误差允许范围内并未发生明显变化，硬质泡沫材料在高温蠕变特性测量试验时的失效机理未发生改变。

### 2.2 压缩特性研究

对蠕变特性试验后硬质泡沫材料进行压缩特性试验，测得各试件的应力-应变数据。将同一状态下的多组数据进行平均，得到硬质泡沫材料的压缩弹性模量  $E$  及压缩强度极限  $\sigma_{0.1}$ ，见表2。对比数据可知，各试件的压缩特性并未发生规律性变化。

表1 本构关系拟合公式系数  
Tab.1 Formula coefficient of constitutive relations

$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3/10^4$	$A_4/10^5$	$A_5/10^5$	$A_6/10^6$	$A_7/10^6$	$A_8/10^6$	$A_9/10^5$
-0.72	292.05	-4 936.83	4.45	-2.37	7.76	-1.59	1.97	-1.36	3.97
-0.57	234.38	-3 961.63	3.55	-1.87	6.07	-1.23	1.52	-1.04	3.05
-0.92	278.66	-4 443.30	3.85	-1.99	6.38	-1.29	1.58	-1.08	3.15
-0.58	184.83	-3 231.03	2.94	-1.56	5.10	-1.03	1.28	-8.79	2.57
-0.67	229.72	-3 941.68	3.56	-1.88	6.14	-1.25	1.54	-1.05	3.10
-0.69	237.60	-3 930.02	3.48	-1.82	1.19	-1.47	1.46	-1.01	2.94
-0.72	225.78	-3 805.97	3.41	-1.79	5.82	-1.18	1.46	-1.00	2.93
-0.98	270.07	-4 243.93	3.61	-1.83	5.75	-1.13	1.37	-0.922	2.65
-0.73	259.08	-4 350.72	3.88	-2.03	6.59	-1.34	1.64	-1.12	3.28
-0.58	267.58	-4 537.53	4.15	-2.24	7.53	-1.58	2.01	-1.42	4.29
-0.50	238.23	-3 594.08	2.85	-1.32	3.78	-0.671	0.773	-0.432	1.10
-0.98	253.05	-3 290.97	3.28	-1.63	5.07	-0.99	1.18	-0.788	2.25
-0.99	281.14	-4 361.43	3.61	-1.73	4.97	-0.832	0.738	-0.242	-2.98
-0.95	244.60	-3 890.23	3.33	-1.68	5.29	-1.05	1.26	-0.844	2.42
-0.61	263.94	-4 284.43	3.77	-1.97	6.40	-1.30	1.60	-0.011 0	3.20
-0.62	263.94	-4 284.43	3.77	-1.97	6.40	-1.30	1.60	-1.10	3.20
-1.42	246.75	-3 013.09	1.97	-0.756	0.176	-0.246	0.194	-0.072 6	7 009.03
-0.61	252.31	-4 162.71	3.69	-1.93	6.28	-1.28	1.58	-0.010 8	3.18
-0.80	267.30	-4 436.63	3.91	-2.03	6.52	-1.31	1.61	-0.010 9	3.18
-0.69	277.28	-4 407.36	3.81	-1.97	6.33	-1.28	1.57	-0.010 8	3.15

表2 各样件的压缩弹性模量  
Tab.2 The compressive elastic modulus of samples

80 °C			100 °C			120 °C		
Time/h	$E/MPa$	$\sigma_{0.1}/MPa$	Time/h	$E/MPa$	$\sigma_{0.1}/MPa$	Time/h	$E/MPa$	$\sigma_{0.1}/MPa$
1	173.245	6.134	1	167.282	5.769	1	170.459	6.121
4	168.242	6.657	4	174.422	6.229	2	164.845	6.693
16	165.565	6.468	16	161.202	5.730	8	166.181	5.657
32	167.039	5.507	32	183.519	6.466	36	168.247	5.702
48	172.207	5.967	48	156.616	5.346	72	183.176	6.585
—	—	—	72	185.993	6.463	—	—	—

### 3 硬质泡沫材料的时温等效特性分析

分析硬质泡沫材料的高温蠕变特性可知, 泡沫材料在高温下蠕变加速性能明显, 对泡沫材料蠕变数据进行数据转换分析, 得到其蠕变量与对数时间的变化曲线, 如图 3 所示。分析得知, 对于泡沫弹架材料时温等效 (Time-Temperature Superposition, TTS) 原理<sup>[14-16]</sup>仍近似适用, 即某一温度下的力学性能曲线可以通过另一温度下的力学性能曲线在对数时间轴上进行平移得到。以 60 °C 的泡沫弹架材料对数时间蠕变曲线为基准, 将其他温度的曲线向 60 °C 基准曲线左右平移, 得到泡沫弹架材料 60 °C 蠕变对数时间轴曲线, 如图 4 所示。可以看出, 移动后曲线的重合程度良好。

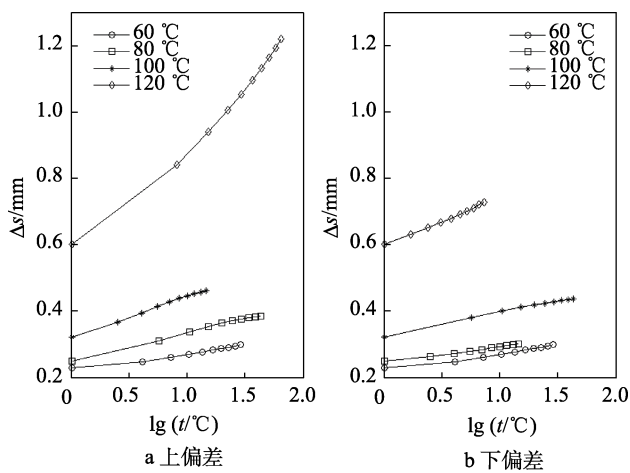


图 3 泡沫弹架材料的  $\Delta s$ - $\lg(t)$  关系曲线

Fig.3 Relationship curve of the  $\Delta s$ - $\lg(t)$ : a) upper deviation; b) lower deviation

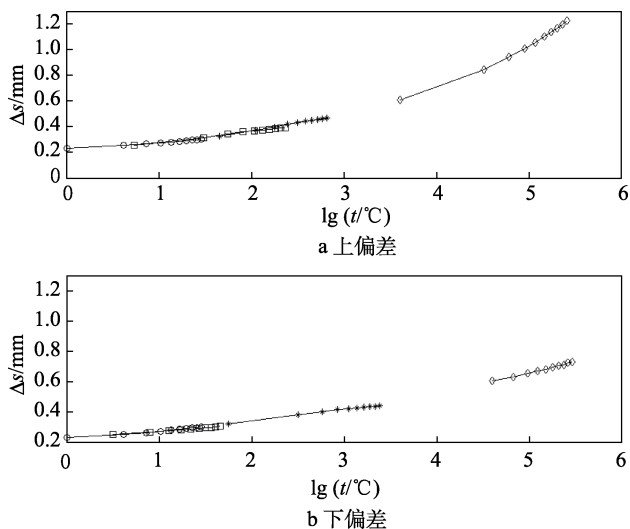


图 4 根据时温等效原理得到的 60 °C 主曲线

Fig.4 Main curve by time-temperature superposition method at 60 °C: a) upper deviation; b) lower deviation

TTS 原理可借助 Williams-Landel-Ferry 方程 (简称“WLF 方程”)<sup>[17-18]</sup>中的转换因子  $\alpha_T$  实现, 如式(2)所示。

$$\lg \alpha_T = \lg \left( \frac{\tau}{\tau_r} \right) = \left( \frac{-C_1(t-t_r)}{C_2+(t-t_r)} \right) \quad (2)$$

式中:  $\alpha_T$  为位移因子 (Shift Factor);  $C_1$  和  $C_2$  是 2 个经验参数;  $t$  为任意温度;  $t_r$  为参考温度;  $\tau$  和  $\tau_r$  分别为温度  $t$  和  $t_r$  对应的松弛时间。将式(2)倒置, 可得:

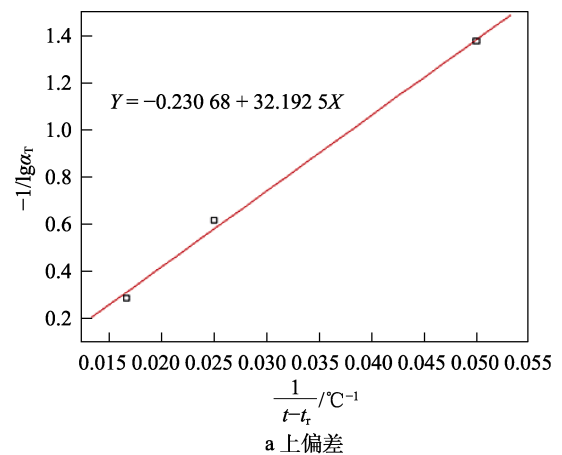
$$-\frac{1}{\lg \alpha_T} = \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{1}{t-t_r} + \frac{1}{C_1} \quad (3)$$

绘制  $-1/\lg \alpha_T$  与  $1/(t-t_r)$  关系图, 则  $C_1$  和  $C_2$  可由直线斜率  $C_2/C_1$  及截距  $1/C_1$  求得。以 60 °C 作为参考温度, 计算得到各温度的  $-1/\lg \alpha_T$  随  $1/(t-t_r)$  的变化值, 见表 3。

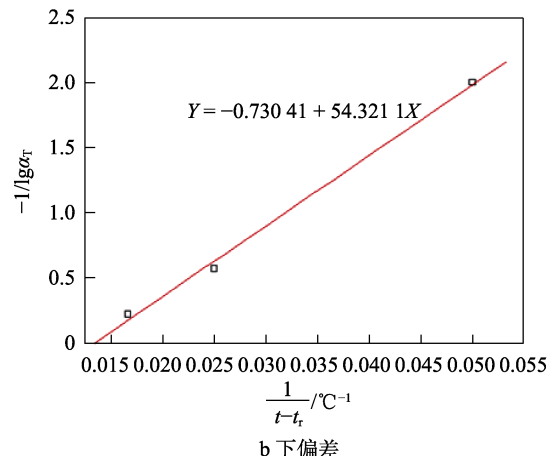
表 3  $-1/\lg \alpha_T$  随  $1/(t-t_r)$  的变化  
Tab.3  $-1/\lg \alpha_T$  with change of  $1/(t-t_r)$

	80 °C	100 °C	120 °C
$1/(t-t_r)$	0.05	0.025	0.016 67
$-1/\lg \alpha_T$ 上偏差	1.37	0.61	0.28
$-1/\lg \alpha_T$ 下偏差	2.00	0.57	0.22

绘制  $-1/\lg \alpha_T$  随  $1/(t-t_r)$  的散点图, 并进行线性回归, 结果如图 5 所示。得到的上、下偏差直线方程分别如式(4)和式(5)所示。



a) 上偏差



b) 下偏差

图 5  $-1/\lg \alpha_T$  随  $1/(t-t_r)$  的变化曲线

Fig.5 Relationship curve between  $-1/\lg \alpha_T$  and  $1/(t-t_r)$ : a) upper deviation; b) lower deviation

$$-1/\lg\alpha_T=32.1925/(t-t_r)-0.23068 \quad (4)$$

$$-1/\lg\alpha_T=54.3211/(t-t_r)-0.73042 \quad (5)$$

因此, 可以得出硬质泡沫材料的拟 WLF 方程,

见式(6)和式(7)。

$$\lg\alpha_T = \lg\left(\frac{\tau}{\tau_r}\right) = \frac{4.34(t-t_r)}{-139.6+(t-t_r)} \quad (6)$$

$$\lg\alpha_T = \lg\left(\frac{\tau}{\tau_r}\right) = \frac{1.37(t-t_r)}{-74.4+(t-t_r)} \quad (7)$$

## 4 硬质泡沫弹架加速贮存试验与寿命评估

加速贮存试验是在不改变产品实际贮存条件下的失效机理, 又不增加新的失效机理的前提下, 通过加大贮存环境试验应力, 使得产品加速退化, 根据加速贮存试验结果, 预计正常贮存环境应力下产品的贮存寿命<sup>[19-21]</sup>。对于硬质泡沫弹架结构的系统级产品, 由于其本身结构复杂, 贮存环境应力也非单一, 经历加速贮存试验后的硬质泡沫弹架结构需要进一步通过环境适应性试验鉴定和功能/性能检验的方法, 验证与评定其长贮稳定性。

根据泡沫弹架材料的拟 WLF 方程, 假定硬质泡沫弹架的实际贮存温度为  $t_1$ 、贮存寿命为  $\tau_1$ , 在实验室进行的加速贮存试验, 温度为  $t_h$ 、加速贮存时间试验时间为  $\tau_h$ 。以  $t_r=60^\circ\text{C}$  作为参考温度, 推导可得加速贮存试验加载时间条件的计算公式, 见式(8)。

$$\tau_1 \frac{\lg^{-1}\left[\frac{4.34(t_h-t_r)}{-139.6+(t_h-t_r)}\right]}{\lg^{-1}\left[\frac{4.34(t_1-t_r)}{-139.6+(t_1-t_r)}\right]} \leq \tau_h \leq \tau_1 \frac{\lg^{-1}\left[\frac{1.37(t_h-t_r)}{-74.4+(t_h-t_r)}\right]}{\lg^{-1}\left[\frac{1.37(t_1-t_r)}{-74.4+(t_1-t_r)}\right]} \quad (8)$$

某型硬质泡沫弹架的贮存寿命指标要求是  $\tau_1 \geq 12\text{ a}$ , 对该型硬质泡沫弹架在实验室进行加速贮存试验, 并通过环境适应性试验鉴定和功能/性能检验, 考核其能否满足贮存寿命指标要求。

在实验室进行加速贮存试验的温度取  $t_h=90^\circ\text{C}$ , 已知该型硬质泡沫弹架在实际贮存条件库房贮存温度  $t_1=25^\circ\text{C}$ , 取  $\tau_1=12\text{ a}$ , 则由式(8)可以算得:  $4\ 547\text{ h} > \tau_h > 920\text{ h}$ 。从工程设计的考核验证考虑, 本次加速贮存试验时间取上限值, 即在实验室进行高温加速贮存试验时, 采用  $t_h=90^\circ\text{C}$  的高温加载条件, 加速贮存的试验时间应不少于  $4\ 547\text{ h}$  (190 d)。

在进行该型硬质泡沫弹架实验室加速贮存试验过程中, 选取一套硬质泡沫弹架试验件, 在  $90^\circ\text{C}$  进行了 190 d 的高温压缩蠕变试验。试验后, 对该型硬质泡沫弹架进行了运输振动试验、随机振动试验和高频冲击试验, 产品的结构承载性能完好, 并通过了一系列功能性能试验的考核, 能够满足导弹武器系统的

使用要求。因此, 该型硬质泡沫弹架能够满足贮存寿命  $\tau_1 \geq 12\text{ a}$  的指标要求。

## 5 结论

1) 硬质泡沫材料的蠕变特性是泡沫弹架的贮存敏感应力, 是影响其长贮失效机理的关键因素。

2) 高温蠕变试验后, 硬质泡沫材料的本构关系及压缩特性均未发生规律性变化, 加速贮存时的失效机理未发生改变, 符合进行加速贮存试验的前提条件要求。

3) 对于泡沫弹架材料, 时温等效原理仍近似适用, 通过材料力学性能曲线在对数时间轴上的平移, 可以实现短时高温对长时低温环境适应性效果的模拟。

4) 针对某型硬质泡沫弹架, 设计并开展了加速贮存试验, 试验后通过环境鉴定试验及功能/性能试验, 验证了其能够满足不小于 12 a 的贮存寿命指标要求。

## 参考文献:

- [1] 陈万创, 李爱国. 舰空导弹贮存可靠性研究[J]. 上海航天, 2007, 24(1): 56-60.  
CHEN Wan-chuang, LI Ai-guo. Research on Storage Reliability of Ship to Air Missile[J]. Aerospace Shanghai, 2007, 24(1): 56-60.
- [2] 王军生, 徐胜红, 徐智明. 导弹贮存可靠性预测建模方法[J]. 战术导弹技术, 2007(6): 28-32.  
WANG Jun-sheng, XU Sheng-hong, XU Zhi-ming. Modeling Method for Missile Storage Reliability Forecast[J]. Tactical Missile Technology, 2007(6): 28-32.
- [3] 张仕念, 何敬东, 颜诗源, 等. 导弹贮存延寿的技术途径及关键技术[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 37-41, 64.  
ZHANG Shi-nian, HE Jing-dong, YAN Shi-yuan, et al. Basic Approaches and Key Techniques for Missile Storage Life Extension[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 37-41, 64.
- [4] 罗天元, 周堃, 余淑华, 等. 国外弹药贮存寿命试验与评价技术概述[J]. 装备环境工程, 2005, 2(4): 17-22.  
LUO Tian-yuan, ZHOU Kun, YU Shu-hua, et al. Summarization on Foreign Ammunition Storage Life Test and Evaluation Technology[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(4): 17-22.
- [5] 王宜晓, 刘晓恩. 美国“民兵”3 和“三叉戟”2 导弹改进计划综述[J]. 中国航天, 2011(6): 35-37.  
WANG Yi-xiao, LIU Xiao-en. An Overview to the US Minuteman 3 and Trident 2 Missile Improvement Projects[J]. Aerospace China, 2011(6): 35-37.
- [6] 张仕念, 孟涛, 张国彬, 等. 从民兵导弹看性能改进在导弹武器贮存延寿中的作用[J]. 导弹与航天运载技术, 2012(1): 58-61.

- ZHANG Shi-nian, MENG Tao, ZHANG Guo-bin, et al. Effect of Performance Improvement in Guided Missile Weapon Storage Life Prolonging Indicated by Militiaman Missile[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2012(1): 58-61.
- [7] 周堃, 罗天元, 张伦武. 火箭贮存寿命预测预报技术综述[J]. *装备环境工程*, 2005, 2(2): 6-11.  
ZHOU Kun, LUO Tian-yuan, ZHANG Lun-wu. Prediction Techniques for Storage Life of Missiles[J]. *Metal Forming Technology*, 2005, 2(2): 6-11.
- [8] 胡运立, 邹传品, 苏醒, 等. 聚氨酯/环氧树脂互穿网络聚合物硬质泡沫机械性能研究[J]. *聚氨酯工业*, 2006, 21(6): 18-21.  
HU Yun-li, ZOU Chuan-pin, SU Xing, et al. Research of Mechanical Property of PU/EP IPN Rigid Foams[J]. *Polyurethane Industry*, 2006, 21(6): 18-21.
- [9] 刘新民, 柴正鹏. 多功能复合板用聚氨酯硬质泡沫塑料的性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2006, 33(2): 26-29.  
LIU Xin-min, CHAI Zheng-peng. Studies on the Rigid Polyurethane Foam Plastic Property[J]. *New Building Materials*, 2006, 33(2): 26-29.
- [10] 米星宇, 张广成, 张乐, 等. 硬质泡沫塑料耐热性测试方法研究[J]. *工程塑料应用*, 2012, 40(8): 71-76.  
MI Xing-yu, ZHANG Guang-cheng, ZHANG Le, et al. Heat Resistance Testing Methods of Rigid Foam Plastics[J]. *Engineering Plastics Application*, 2012, 40(8): 71-76.
- [11] 李智华. 聚氨酯硬质泡沫塑料低温热导率[J]. *中国塑料*, 1989, 3(4): 96-100.  
LI Zhi-hua. Thermal Conductivity of Rigid Polyurethane Foams at Low Temperature[J]. *China Plastics*, 1989, 3(4): 96-100.
- [12] 丁雪佳, 薛海蛟, 李洪波, 等. 硬质聚氨酯泡沫塑料研究进展[J]. *化工进展*, 2009, 28(2): 278-282.  
DING Xue-jia, XUE Hai-jiao, LI Hong-bo, et al. Review of Rigid Polyurethane Foam Plastic[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2009, 28(2): 278-282.
- [13] 宫晓春, 胡彦平, 唐保强. 某型硬质泡沫塑料弹架结构长贮特性和本构关系研究[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(1): 139-146.  
GONG Xiao-chun, HU Yan-ping, TANG Bao-qiang. Long-Term Storage Property and Constitutive Relation of Rigid Foamed Plastic Missile-Launcher[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(1): 139-146.
- [14] 刘元俊, 冯永强, 贺传兰, 等. 玻璃微珠增强硬质聚氨酯泡沫塑料的压缩性能及热稳定性[J]. *复合材料学报*, 2006, 23(2): 65-70.  
LIU Yuan-jun, FENG Yong-qiang, HE Chuan-lan, et al. Compressive Properties and Thermal Stability of Glass Bead Reinforced Rigid Polyurethane Foams[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2006, 23(2): 65-70.
- [15] 毋登辉, 赵培华, 王晓峰, 等. 无卤型阻燃全水发泡硬质聚氨酯泡沫塑料的制备及性能研究[J]. *功能材料*, 2013, 44(10): 1404-1408.  
WU Deng-hui, ZHAO Pei-hua, WANG Xiao-feng, et al. Preparation and Properties of Water Blown Polyurethane Rigid Foam with Halogen Free Flame Retardance[J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(10): 1404-1408.
- [16] 胡时胜, 刘剑飞, 王梧. 硬质聚氨酯泡沫塑料本构关系的研究[J]. *力学学报*, 1998, 30(2): 151-156.  
HU Shi-sheng, LIU Jian-fei, WANG Wu. Study of the Constitutive Relationship of Rigid Polyurethane Foam[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1998, 30(2): 151-156.
- [17] 吴蓁, 郭青, 沈军, 等. 硬质聚氨酯泡沫塑料结构及其性能的研究[J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(4): 453-457.  
WU Zhen, GUO Qing, SHEN Jun, et al. Study on Structure and Property of Rigid Polyurethane Foam[J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(4): 453-457.
- [18] 卢子兴, 田常津, 韩铭宝, 等. 聚氨酯泡沫塑料在应力波加载下的压缩力学性能研究[J]. *爆炸与冲击*, 1995, 15(4): 382-388.  
LU Zi-xing, TIAN Chang-jin, HAN Ming-bao, et al. Investigation of the Mechanical Properties of Compression on Polyurethane Rigid (PUB) Foam Plastics under Stress Wave Loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1995, 15(4): 382-388.
- [19] 贾展宁. 硬质聚氨酯泡沫塑料老化试验及使用寿命预估方法[J]. *火炸药学报*, 1995(2): 30-34.  
JIA Zhan-ning. Studies on Preparation and Optical Properties of Silver-White Titania-Mica Pearlescent Pigments[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1995(2): 30-34.
- [20] 李敬明, 庞海燕, 郭坤, 等. 基于WLF方程的硬质聚氨酯泡沫塑料贮存寿命评估[J]. *塑料工业*, 2006, 34(1): 29-31.  
LI Jing-ming, PANG Hai-yan, GUO Kun, et al. Storage Life Evaluation of Rigid PU Foam by WLF Equation[J]. *China Plastics Industry*, 2006, 34(1): 29-31.
- [21] 卢子兴. 聚氨酯泡沫塑料拉伸本构关系及其失效机理的研究[J]. *航空学报*, 2002, 23(2): 151-154.  
LU Zi-xing. Investigation into the Tensile Constitutive Relation and Failure Mechanism of Pur Foamed Plastics[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2002, 23(2): 151-154.

责任编辑: 刘世忠