

# 某型橡胶减振器的加速老化寿命试验研究

刘佩风, 刘宇峰, 唐保强, 徐弘达

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

**摘要:** **目的** 对某型橡胶减振器进行加速老化试验研究, 利用试验数据评估得到产品的贮存寿命。**方法** 采用恒定应力加速试验方法, 分四个温度应力量级, 对橡胶减振器的压缩永久变形试样开展加速老化试验, 获得试样的退化数据。对试验数据进行分析计算, 评估得到橡胶减振器材料的贮存寿命。**结果** 通过评估, 得到该型减振器材料的贮存寿命能够达到 12.36 年, 置信度大于 0.99。同时利用减振器真实产品的老化试验验证了寿命评估结果。**结论** 以温度为敏感应力, 采用恒定应力加速贮存试验方法, 可以在短时间内快速获得置信度较高的材料常温贮存寿命, 结合真实产品验证评估结果, 为类似产品的寿命预测提供支撑。

**关键词:** 橡胶; 减振器; 加速老化试验; 寿命评估

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.03.002

**中图分类号:** TQ336.4+2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)03-0005-04

## Accelerated Life Testing of a Rubber Vibration Isolator

LIU Pei-feng, LIU Yu-feng, TANG Bao-qiang, XU Hong-da  
(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT: Objective** To design the accelerated storage test for some rubber vibration isolator and get the storage life of product by evaluating experiment data. **Methods** The constant stress accelerated storage testing with four temperature stresses were carried out to have accelerating aging test for compression set sample of rubber vibration isolator. By analyzing and calculating the degeneration data, the storage life of materials for the rubber vibration isolator was evaluated and obtained. **Results** By evaluating, the storage life of materials for the rubber vibration isolator would reach 12.36 years. The confidence level could reach at least 0.99. Meanwhile, the aging test of real products of shock absorber verified the result of life assessment. **Conclusion** The constant stress accelerated storage testing with temperature as the sensitive stress can speed up the process of product failure and accelerate to obtain storage life with high confidence level. It could provide support for life prediction of similar products in combination with verification and evaluation result of real product.

**KEY WORDS:** some rubber; vibration isolator; accelerated aging test; life assessment

橡胶减振器作为一类重要的减振元件, 被广泛应用于各类机械、汽车、铁路机车、水上运输工具、航空航天等领域<sup>[1]</sup>。橡胶材料具有较强的黏弹阻尼特性, 其宏观力学性能表现为力与变形呈非线性关系<sup>[2]</sup>。其老化的基本原理是热、氧、光和臭氧等老化因子的作用, 使橡胶产生交联或降解等化学反应, 宏观则表现为物理-力学性能的改变, 最终失去使用性能<sup>[3]</sup>。橡胶

减振器具有范围大、阻尼高、可自由选形、能同时承受多向载荷的优点, 在导弹武器各型号中获得了广泛的认可。目前橡胶减振器的贮存期指标评定尚无有效的方法, 这既影响了橡胶减振器的定型, 也成为了约导弹等武器大修周期的瓶颈之一<sup>[4]</sup>。因此, 橡胶减振器作为导弹武器大修时的必换件, 其贮存寿命预测和评估成为当前学术界研究的热门<sup>[5-14]</sup>。

收稿日期: 2018-06-26; 修订日期: 2018-09-02

作者简介: 刘佩风(1988—), 男, 河南人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境、可靠性及加速贮存试验技术。

某型导弹控制系统关键单机中安装了橡胶减振器,材料主要为硅橡胶,结构模型如图1所示。在贮存过程中,导弹密封状态良好,周围有发射筒和包装箱保护,可防止水分侵蚀,因此湿度、机械应力、腐蚀应力等影响较小,可忽略不计。橡胶减振器的随弹库房贮存即可简化为温度单因素的贮存问题,所以在加速贮存试验中主要考虑温度应力,选取 Arrhenius 方程作为温度加速模型。

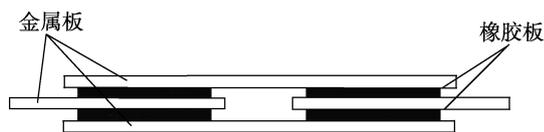


图1 橡胶减振器模型

恒定应力加速贮存试验是先选一组加速应力水平,譬如  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $\dots$ 、 $S_k$ , 它们均高于正常应力水平  $S_0$ , 一般  $S_0 < S_1 < S_2 < \dots < S_k$ 。然后将一定数量的样品分为  $k$  组, 每组在一个加速应力水平下进行贮存试验, 直到各组均有一定数量的样品发生失效为止。恒定应力加速贮存试验是由若干个应力水平下的贮存试验组成, 为了缩短试验时间, 常采用截尾方案<sup>[15]</sup>。

## 1 试验及评估

### 1.1 恒定应力加速贮存试验

库房贮存后, 橡胶减振器须保证产品贮运和使用时的振动响应和谐振频率在规定的范围内, 否则将造成产品承受的振动量级放大而失效。橡胶减振器加速贮存试验思路一般为: 通过压缩永久变形试验, 获得常温贮存状态下橡胶阻尼材料的老化动力学模型和老化速率常数。通过阻尼性能试件和真实产品的加速贮存试验, 对橡胶减振器的性能进行监测。当试验中所测性能不满足要求时, 获取所对应的材料蠕变值(对应的压缩永久变形率值), 作为产品贮存后性能是否满足设计要求的临界值, 从而结合材料老化动力学模型和老化速率常数来评估橡胶减振器压缩永久变形试样的贮存寿命。利用评估结果, 将真实产品加速至所求寿命年限, 通过地面鉴定试验, 验证产品长期贮存后的可用性。

试验用压缩永久变形试样为  $\phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的圆柱体, 按研制任务书要求的减振器的装配压缩率(50%), 采用专用工装进行轴向压缩, 应用限位器确保试件均匀地压缩到规定高度。应力水平大小的选取结合产品所能承受的温度极限与实际贮存条件, 同时确保不改变产品的失效机理<sup>[16]</sup>。根据摸底试验结果选取了四组温度应力, 分别是 65、75、85、95  $^{\circ}\text{C}$ 。在试验过程中, 为监测产品的性能退化趋势, 在每个温度量级达到规定的贮存时间后, 进行常温下的性能测试。试验和测试方法按 GJB 92.1—86《热空气老化

法测定硫化橡胶贮存性能导则 第一部分: 试验规程》进行, 依据设计指标, 当压缩永久变形率大于等于 65% 时, 产品失效。

### 1.2 试验数据

试样压缩永久变形试验结果统计见表1。65、75、85  $^{\circ}\text{C}$  下累计加速贮存 27 d; 95  $^{\circ}\text{C}$  下累计加速贮存 20 d。

表1 某型橡胶减振器材料加速老化压缩永久变形率数据 %

| 时间/d | 应力水平/ $^{\circ}\text{C}$ |       |       |       |
|------|--------------------------|-------|-------|-------|
|      | 65                       | 75    | 85    | 95    |
| 0.5  | /                        | /     | /     | 10.93 |
| 1    | 5.909                    | 7.526 | 11.84 | 16.79 |
| 1.5  | /                        | /     | /     | 22.50 |
| 2    | 9.792                    | 12.84 | 19.65 | 26.34 |
| 2.5  | /                        | /     | /     | 30.67 |
| 3    | 12.54                    | 16.71 | 25.51 | 33.85 |
| 4    | /                        | /     | /     | 40.71 |
| 5    | 16.62                    | 22.69 | 34.73 | 45.12 |
| 7    | 19.22                    | 26.98 | 41.99 | 54.23 |
| 9    | /                        | /     | /     | 61.87 |
| 10   | 23.22                    | 32.99 | 50.52 | /     |
| 11   | /                        | /     | /     | 66.52 |
| 13   | 26.34                    | 37.42 | 57.95 | /     |
| 16   | /                        | /     | /     | 76.39 |
| 17   | 30.96                    | 42.29 | 63.65 | /     |
| 20   | /                        | /     | /     | 80.66 |
| 21   | 34.40                    | 46.69 | 68.98 | /     |
| 22   | /                        | /     | /     | /     |
| 27   | 36.81                    | 52.53 | 73.65 | /     |

### 1.3 贮存寿命评估

根据 GJB 92.2—1986《热空气老化法测定硫化橡胶贮存性能导则》第二部分, 采用逐次逼近方法确定估计时间指数  $\alpha$ , 使  $I$  最小。

$$I = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (P_{ij} - \hat{P}_{ij})^2 \quad (1)$$

式中:  $P_{ij}$  为第  $i$  个老化试验温度下, 第  $j$  个测试点的性能变化指标试验值;  $\hat{P}_{ij}$  为第  $i$  个老化试验温度下, 第  $j$  个测试点的性能变化指标预测值。

计算得到橡胶减振器材料老化动力学模型的时间指数为 0.6951, 如图2所示。

根据 GJB 92.2—1986, 选取指数衰减模型式(1)  $P = Ae^{-Kt^\alpha}$  对压缩永久变形数据和老化时间进行回归拟合。各温度下的老化动力学模型参数由图3拟合所得。

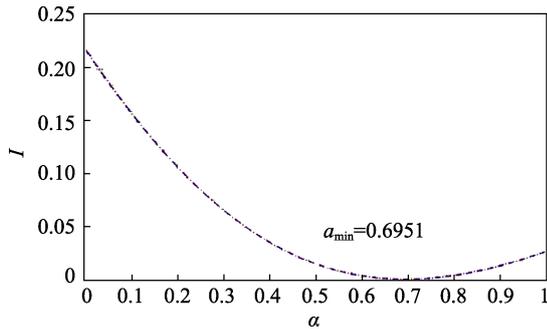


图 2 橡胶材料老化动力学模型的时间指数

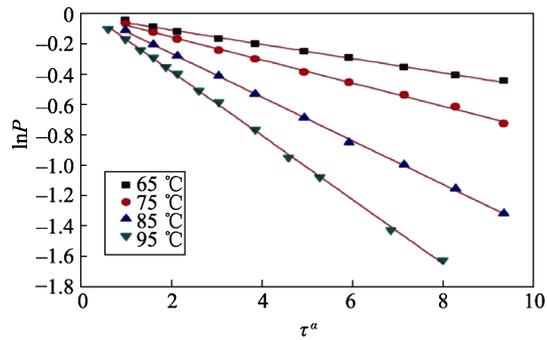


图 3 各温度下的老化动力学模型

得出橡胶减振器材料压缩永久变形试验数据在各加速温度下的拟合方程，列于表 2。

表 2 各温度下老化速率 K 与常数 A 的值

| 温度/°C | 老化速率 K   | 常数 A      | $\bar{A}$ |
|-------|----------|-----------|-----------|
| 65    | 0.016 13 | 0.919 748 | 0.881 233 |
| 75    | 0.026 13 | 0.901 039 |           |
| 85    | 0.049 45 | 0.856 081 |           |
| 95    | 0.079 35 | 0.848 065 |           |

对表 2 中各温度下的拟合方程进行相关性检验，显著性水平  $\alpha$  选取 0.01。经检验，四个加速温度下，拟合方程的相关系数均大于相关系数检验表所要求的  $r$  值，满足相关性检验要求。其对应的拟合曲线如图 4 所示。

公式  $\ln \bar{K} = a + b \frac{1}{T}$  各系数见表 3，

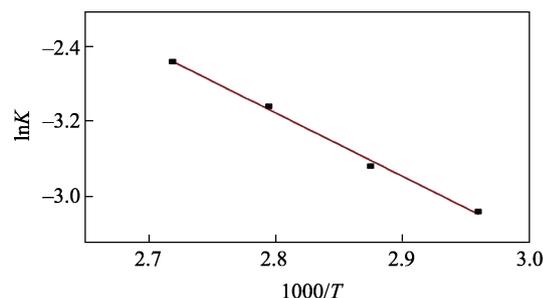


图 4 橡胶减振器材料各温度下的活化能

表 3 各系数的计算值

| $a$     | $b$     | $r$     | $S_y$    | $tS_y$ |
|---------|---------|---------|----------|--------|
| 15.7717 | 6.73548 | 0.99398 | 0.184811 | 1.2871 |

得到：

$$\ln \bar{K} = a + b \frac{1}{T} = 15.7717 - 6.73548 \times \frac{1}{T} \times 10^3 \quad (2)$$

置信度为 99% 时的上限为：

$$\ln K = a + b \frac{1}{T} = 15.7717 + 1.2871 - 6.73548 \times \frac{1}{T} \times 10^3 \quad (3)$$

将各老化温度下的老化速率  $K$  代入 Arrhenius 式 (2)，以式 (3) 为外推模型，拟合外推平均贮存温度为 20 °C 时的拟合方程，列于表 4。所得 20 °C 下橡胶减振器材料的退化趋势如图 5 所示。橡胶减振器材料在以压缩永久变形率  $\varepsilon=65\%$  作为能够满足设计要求评估判据的临界值，将其带入下限寿命拟合方程可得，橡胶减振器材料在贮存温度为 20 °C 的环境中，贮存寿命达到 12.36 年，置信度大于 0.99。

表 4 橡胶减振器材料贮存温度下的拟合方程 (平均贮存温度为 20 °C)

| 置信度  | 下限寿命拟合方程  | 相关系数     | 相关系数检验 ( $\alpha=0.01$ ) |
|------|---|----------|--------------------------|
| 0.99 | $1 - \varepsilon = 0.881233 \exp(-0.002661\tau^{0.6951})$ | -0.99799 | 要求 $ r  \geq 0.99$       |

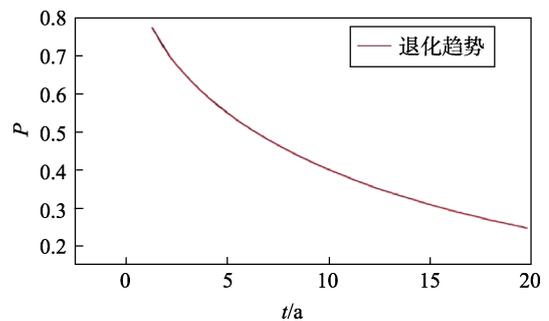


图 5 20 °C 下橡胶减振器材料的退化趋势

### 3 真实产品验证试验

选取 65 °C 温度应力量级，按求出的材料贮存寿命，将橡胶减振器真实产品安装在某型单机上开展加速老化试验。根据公式  $P = Ae^{-K\tau^\alpha}$ ，已知性能参数  $P$ 、常数  $A$ 、时间指数  $\alpha$  和材料 65 °C 下的性能退化速率常数  $K$ ，可求出真实产品的等效加速贮存试验时间。产品等效加速至规定寿命年限后，通过地面鉴定试验测定橡胶减振器的减振效率和一阶谐振频率，从而验证橡胶减振器长期贮存后的使用性能满足设计要求。减振器安装状态如图 6 所示。减振器老化前后的振动

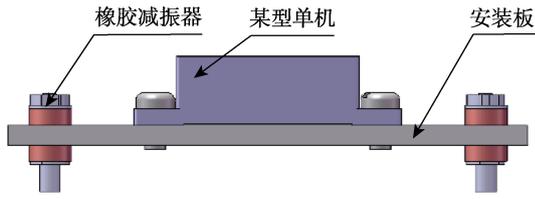


图6 某型橡胶减振器安装状态

响应测量值见表5。

根据表5可以看出,橡胶减振器老化后的振动监测值和一阶谐振频率的变化均未超过老化前的±25%。因此经过地面鉴定试验验证,该型橡胶减振器真实产品等效贮存12.36年后,减振效率和谐振频率均在规定的范围内,即满足使用要求。

表5 老化前后产品振动响应测量值

| 减振器状态 | 振动目标值<br>(Grms)/g | Control<br>(Grms)/g | 控制点/g         |               |               | 监测点/g         | 一阶谐振频率<br>/Hz |
|-------|-------------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|       |                   |                     | CH1<br>(Grms) | CH2<br>(Grms) | CH3<br>(Grms) | CH4<br>(Grms) |               |
| 老化前   | 8.2               | 8.245               | 8.395         | 8.113         | 8.018         | 4.841         | 67.5          |
| 老化后   |                   | 8.241               | 8.271         | 8.179         | 8.164         | 4.695         | 65            |

### 4 结论

通过恒定应力试验方法开展加速老化试验,获得了某型橡胶减振器在不同贮存温度下的压缩永久变形率数据,对试验数据进行拟合计算,寿命评估结果表明:

- 1) 应用恒定应力加速贮存试验方法,可以在短时间内快速获得置信度较高的产品常温贮存寿命,为类似产品的寿命预测提供支撑。
- 2) 通过压缩永久变形试样的老化试验,获得了该型减振器产品的贮存寿命能够达到12.36年,置信度大于0.99。
- 3) 对该型橡胶减振器的真实产品开展加速老化试验,等效贮存规定寿命年限后,通过地面鉴定试验,验证了产品满足12.36年的使用要求。

### 参考文献:

[1] 寇晓阳, 孟宪举. 橡胶减振器数学建模[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 59-62.

[2] RAO M D, WIRKNER K J, GRUENBERG S. Dynamic Characterization of Automotive Exhaust Isolators[J]. Journal of Automobile Engineering, 2004, 218(8): 891- 900.

[3] 陈津虎, 金锐, 李星, 等. 某型硅橡胶减振器的加速贮存试验技术研究[J]. 强度与环境, 2013, 40(1): 54-57.

[4] 肖琰, 魏伯荣, 杜茂平. 橡胶加速老化试验及贮存期推算方法[J]. 合成材料老化与应用, 2007, 36(1): 40-43.

[5] 肖琰, 魏伯荣, 刘郁杨, 等. 热氧老化对天然橡胶硫化

胶交联结构及力学性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2008(1): 67-70.

[6] 李敏伟, 傅耘, 王丽, 等. 加速贮存寿命试验设计方法研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 58-64.

[7] 马同玲, 党晓勇, 庞明磊. 基于加速老化和自然贮存数据的氟硅橡胶制品贮存寿命预估[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 65-69.

[8] 李锴, 高军, 李小兵, 等. 装备贮存寿命综合评价方案[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2015, 33(4): 50-54.

[9] 张生鹏, 李晓钢. 某橡胶减振垫加速贮存老化试验及寿命预测[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 24-28.

[10] 王荣华, 李晖, 孙岩, 等. 橡胶材料加速老化研究现状及发展趋势[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 66-70.

[11] 张海, 余闯, 王晓红. 应用环境应力分类的加速贮存退化试验评估方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 87-89.

[12] 那洪东. 硫化橡胶老化定量分析法[J]. 世界橡胶工业, 2017, 44(2): 21-27.

[13] 陶桂东, 吕文俊, 曾宪奎, 等. 基于WLF方程的橡胶减振器老化寿命预测[J]. 橡塑技术与装备, 2017, 43(3): 67-70.

[14] 刘佩风, 杨学印, 牛建朝, 等. 可靠性试验中橡胶减振器性能变化规律研究[J]. 环境技术, 2018, 36(5): 52-57.

[15] 孟涛. 导弹贮存延寿技术概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013.

[16] 杨志宏, 刘佩风, 马晓东, 等. 某天线加速贮存试验与寿命评估方法研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(3): 98- 102.

[17] GJB 92.2—1986, 热空气老化法测定硫化橡胶贮存性能导则第二部分: 统计方法[S].