

装备通用质量特性及寿命评估

# 基于步降应力加速贮存试验的电缆网贮存寿命评估

杨学印<sup>1</sup>, 李宝玉<sup>2</sup>, 陈文辉<sup>3</sup>, 郭城<sup>3</sup>, 白璐<sup>3</sup>

(1.北京强度环境研究所, 北京 100076; 2.中国运载火箭技术研究院, 北京 100076;  
3.北京航天自动控制研究所, 北京 100854)

**摘要:** **目的** 针对某型电缆网开展加速贮存试验设计, 并通过试验预测产品贮存寿命。**方法** 基于步降应力加速贮存试验方法, 结合 Arrhenius 模型, 利用对数正态分布的极大似然估计法, 对试验结果进行评估。**结果** 根据加速贮存试验结果, 在较短时间内评估得到电缆网的贮存寿命, 评估得到电缆网在 25 °C 下的平均寿命点估计值在 20 年以上, 并获得其加速模型和加速因子。**结论** 为电缆网贮存寿命的定量评估提供了一种参考方法, 为武器装备延寿整修提供依据。

**关键词:** 步降应力; 加速贮存; 电缆网; 贮存寿命评估

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.04.017

**中图分类号:** TJ07                      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)04-0087-04

## Storage Life Assessment of Cable Network Based on Step-Down-Stress Accelerated Storage Test

YANG Xue-yin<sup>1</sup>, LI Bao-yu<sup>2</sup>, CHEN Wen-hui<sup>3</sup>, GUO Cheng<sup>3</sup>, BAI Lu<sup>3</sup>

(1.Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China;

2.China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

3.Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

**ABSTRACT: Objective** To design accelerated storage test for a certain type of cable network and predict the storage life of product through test. **Methods** Based on step-down-stress accelerated storage test, in combination with Arrhenius model, the maximum likelihood estimation method of log normal distribution was applied to evaluate the test results. **Results** According to the results of such test, the storage life of cable network was evaluated in a relatively short time. In the environment of the storage temperature below 25 °C, the storage life could be more than 20 years. And the acceleration model and accelerated factor could be obtained. **Conclusion** It provides a reference method for quantitative evaluation of storage life of cable network, and provides a basis for prolonging life and repairing of weapon equipment.

**KEY WORDS:** step-down-stress; accelerated storage; cable network; storage life assessment

电缆网作为武器系统的重要组成部分, 能够为各组件间的连接提供电气接口和信息传输通道, 其贮存性能直接影响着整个武器系统的寿命水平。就其结构组成而言, 电缆网通常由传输线、电连接器、热缩套

管、包覆材料等组成, 结构功能相对简单, 根据自然贮存数据分析, 属于比较典型的高可靠、长寿命的产品。在使用、贮存过程中, 电缆网性能随时间的推移呈现逐渐下降的趋势, 主要有开路、短路、接触不良

三种失效模式，并由此引发整个系统的失效，给系统的使用和维护带来不可预计的损失。因此，针对电缆网开展加速贮存试验研究，分析其贮存失效机理，预测其贮存寿命，并据此开展延寿整修工作是非常必要的。

加速贮存试验技术经过多年的探索应用与发展，根据试验应力的加载方式通常可分为恒定应力试验、步进应力试验和序进应力试验。其中，序进应力试验的加速效率最高，但是其受统计分析的复杂性以及专用试验装置的局限性，应用推广难度较大。恒定应力试验和步进应力试验虽被广泛接受并使用，但随着产品可靠性和寿命水平的不断提高，其试验加速效率不断降低，尤其是在低量级加速阶段，加速时间长与失效数据少的矛盾局面日益凸显，不仅影响了试验效率与周期，也影响了评估周期与结果。

为在较短时间内评估得到电缆网的贮存寿命，为电缆网贮存寿命的定量评估提供一种参考方法，为武器装备延寿整修提供依据，文中基于步降应力加速贮存试验方法开展了试验设计与研究工作。与传统加速寿命试验方法从最低起始应力量级做起的方式相反，步降应力试验首先进行最高应力量级试验，然后逐步降低应力，最后进行最低量级的试验。通过在高量级应力下加速产品损伤累积，从而加快产品的失效，进一步缩短试验时间，提升试验效率，获取评估结果。

## 1 基本理论

步退应力加速贮存试验评估方法自提出以来获得了广泛的关注，多篇文献针对步退试验开展研究工作。对数正态分布模型能够大幅提高试验效率，具有较强的推广应用效果。文中采用寿命分布为对数正态分布的步退应力加速贮存试验评估方法，对弹上电缆网贮存寿命进行评估。

### 1.1 基本假设

对数正态分布场合下步退加速寿命试验通常是在以下四个假定条件下进行的。

**假定 I** 在应力水平  $S_i$  下，产品寿命服从对数正态分布  $LN(\mu_i, \sigma_i^2)$ ,  $i=0,1,\dots,k$ 。对数正态分布的概率密度函数为：

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

**假定 II** 在各应力水平  $S_i$  下，产品的失效机理不变，这意味着分布中的形状参数  $\sigma_i$  相等，即  $\sigma_0 = \sigma_1 = \dots = \sigma_k \hat{=} \sigma$ 。

**假定 III** 分布参数  $\mu_i$  与所加的应力水平  $S_i$  间满足如下的加速方程：

$$\mu_i = a + b\varphi(S_i), \quad i = 0, 1, \dots, k \quad (2)$$

式中： $a, b$  为待估参数； $\varphi(\bullet)$  为已知函数。

为方便起见，记： $\varphi_k \hat{=} \varphi(S_i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, k$ 。

对于利用温度应力加速，加速方程满足 Arrhenius 方程。

**假定 IV**：产品的剩余寿命仅依赖于已累积失效部分和当时应力水平，而与累积方式无关（Nelson 累积失效假定）。

### 1.2 基本步骤

1) 最高应力水平的确定，这是步降应力试验中最重要的环节。加速贮存试验是在保持失效机理不变的前提下，通过提高应力量级的方式缩短试验时间。若最高应力水平选取不当，不仅会影响试验效率，甚至还会导致产品失效机理发生变化，导致评估结果的错误。

2) 在确定最高应力水平后，将一定量的样本置于环境试验箱中，在最高应力等级下进行加速贮存试验。确定试验截尾方式，可以采用定时截尾、定数截尾或定时截尾与定数截尾相结合的试验方式，达到截尾要求后，停止试验。

3) 将剩余样本转入下一个应力量级进行试验，直至达到试验截尾要求。重复 2) 的过程，直至完成所有应力量级下的试验。步退应力试验方式如图 1 所示。

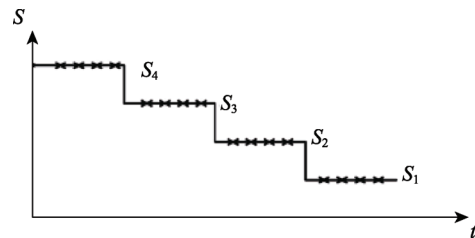


图 1 步退应力试验加载方式

## 2 步退应力加速贮存试验评估方法

步退应力加速贮存试验评估方法中，由于单台产品经历多个应力水平，需要对试验数据进行处理并评估。

### 2.1 数据折算处理

由假定 II 得，分布的形状参数  $\sigma_i$  相等，则在应力水平  $S_i$  下的工作时间  $\tau_i$  折算到应力水平  $S_j$  下的折算时间  $\tau_{ij}$  为：

$$\tau_{ij} = \exp\{\mu_j - \mu_i\} \tau_i, \quad i \neq j \quad (3)$$

$a_1 = 0, a_i = \sum_{l=1}^{i-1} \tau_{li} = \sum_{l=1}^{i-1} e^{b(\varphi_l - \varphi_i)}$ ,  $i = 2, 3, \dots, k$ 。则产品在  $S_i$  下的真实寿命数据为：

$$t_{i1} + a_i \leq t_{i2} + a_i \leq \dots \leq t_{in} + a_i, \quad i = 2, 3, \dots, k \quad (4)$$

即在每一个应力水平  $S_i (i > 1)$  下， $r_i$  个失效产品的

折算寿命为：

$$t_{ij}(b) = \sum_{l=1}^{i-1} \tau_l e^{b(\varphi_i - \varphi_l)} + t_{ij} \quad (5)$$

式中： $i=1,2,\dots,k; j=1,2,\dots,r_i$ ，除  $i=1$  外，它们都是  $b$  的函数。

### 2.2 步退试验数据的极大似然估计

由准样本，得关于  $a, b$  和  $\sigma$  的似然函数为：

$$L(a, b, \sigma) = C \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^{r_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t_{ij}(b)} e^{-A_{ij}} \cdot [1 - \Phi(B_k)]^{n-r} \quad (6)$$

其中：

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \frac{(\ln t_{ij}(b) - a - b\varphi_i)^2}{2\sigma^2} \\ B_k &= \frac{\ln \tau_k(b) - a - b\varphi_k}{\sigma} \\ C &= \frac{n!}{r_1! r_2! \cdots r_k! (n-r)!} \\ \tau_k(b) &= \sum_{l=1}^k \tau_l e^{b(\varphi_k - \varphi_l)} \end{aligned} \quad (7)$$

而  $\Phi(\bullet)$  指标准正态分布的分布函数。

由式 (6) 和式 (7) 得到关于  $a, b$  和  $\sigma$  的如下似然方程组：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_i} A_{ij} + \frac{n-r}{\sigma} W_k = 0 \\ \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_i} \frac{t'_{ij}(b)}{t_{ij}(b)} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_i} A_{ij} \left( \frac{t'_{ij}(b)}{t_{ij}(b)} - \varphi_i \right) + \frac{n-r}{\sigma} W_k \left[ \frac{\tau'_k(b)}{\tau_k(b)} - \varphi_k \right] = 0 \\ \frac{r}{\sigma} - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_i} B_{ij} - \frac{n-r}{\sigma^2} W_k [\ln \tau_k(b) - a - b\varphi_k] \end{cases} \quad (8)$$

其中：

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \frac{\ln t_{ij}(b) - a - b\varphi_i}{\sigma^2} \\ B_{ij} &= \frac{(\ln \tau_{ij}(b) - a - b\varphi_i)^2}{\sigma^3} \\ W_k &= \varphi \left( \frac{\ln \tau_k(b) - a - b\varphi_k}{\sigma} \right) \left( 1 - \Phi \left( \frac{\ln \tau_k(b) - a - b\varphi_k}{\sigma} \right) \right)^{-1} \quad (9) \\ t'_{ij}(b) &= \sum_{l=1}^{i-1} \tau_l (\varphi_i - \varphi_l) e^{b(\varphi_i - \varphi_l)} \\ \tau'_k(b) &= \sum_{l=1}^k \tau_l (\varphi_k - \varphi_l) e^{b(\varphi_k - \varphi_l)} \end{aligned}$$

$\varphi(\bullet)$  和  $\Phi(\bullet)$  分别指标准正态分布的密度函数和分布函数。通过数值方法求解，可得到  $a, b$  和  $\sigma$  的极大似然估计  $\hat{a}, \hat{b}$  和  $\hat{\sigma}$ 。

### 2.3 加速因子求取

该试验评估采用 Arrhenius 模型作为加速模型，方程为：

$$\eta_i = \exp \left( a + \frac{b}{T_i} \right) \quad (10)$$

式中： $\eta_i$  为特征寿命（这里为对数正态分布的中位寿命  $t_{0.5}$ ）； $T_i$  为第  $i$  个温度应力大小（绝对温度）； $a, b$  为待估参数， $b=E_a/k$ ， $E_a$  为激活能； $k$  为玻尔兹曼常数， $k=8.617 \times 10^{-5}$  eV/K。

特征寿命与温度之间的线性对数关系为：

$$\ln t_{0.5} = a + b/T_i \quad (11)$$

根据 Arrhenius 模型可得到加速因子为：

$$A_i = \exp \left[ b \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_i} \right) \right] \quad (12)$$

## 3 电缆网加速贮存试验及评估

文中通过对电缆网开展贮存敏感应力分析。电缆网在长期贮存过程中主要受到环境温度、湿度、通电工作等因素影响，但库房贮存环境较好，且电缆网相对位于产品内部相对密封，通电工作时间与长期贮存相比基本可以忽略。因此选取温度应力作为贮存敏感应力开展加速贮存试验设计。

贮存试验最高温度应力通过温度极限应力摸底试验确定。通过使用一套电缆网依次在 75, 80, 85, 90, 95 °C 下贮存一定时间后，恢复常温检测其通路和绝缘性能，最终选取最高贮存试验温度应力量级为 90 °C，最低贮存试验温度应力在正常应力水平 25 °C 基础上增加 30 °C，取 55 °C。中间两个试验应力利用插值法获取，并另外选用 12 套电缆网在 90, 78, 67, 55 °C 这 4 个应力量级下完成步退应力加速贮存试验，试验采用定时截尾与定数截尾相结合的方式进行。

试验期间产品共发生 10 次故障，故障模式均为绝缘下降，与自然贮存中的故障机理相一致。10 次故障发生的应力水平及试验时间见表 1。

表 1 试验结果信息汇总

序号	故障产品 编号	试验应力 水平/°C	试验截尾时 间/h	试验剩余产 品数量/台
故障 1	13006	90	1600	11
故障 2	13010	90	1700	10
故障 3	13009	90	1800	8
故障 4	13011	90	1800	7
故障 5	13005	90	2000	7
故障 6	13002	78	850	4
故障 7	13003	78	850	4
故障 8	13004	78	850	3
故障 9	13008	55	400	3
故障 10	13016	55	2300	2

通过这 10 次失效,利用基于对数正态分布的极大似然估计法,对试验结果进行评估。评估得到了电缆网在 25 °C 下的平均寿命点估计值在 20 年以上,并获得产品的加速模型和加速因子。

## 4 结语

文中通过分析武器系统电缆网的贮存环境和失效机理,根据失效判据和敏感应力,对电缆网进行了加速贮存试验设计与工程实践,制定了电缆网步退应力加速贮存试验方案并进行实践。根据加速贮存试验结果评估得到该型电缆网在库房贮存环境 25 °C 下的平均寿命点估计值在 20 年以上,为电缆网更换周期提供参考依据,并为电缆网贮存寿命的定量评估提供了一种参考方法。

### 参考文献:

[1] 刘博,李洪儒,李永军,等. 导弹地面电缆网自动测试

系统[J]. 武器装备自动化, 2004, 23(6): 21-22.

- [2] 徐林,邱凯,李瑛,等. 航天压接型电缆组件失效模式与分析[J]. 航天制造技术, 2014(4): 28-31.
- [3] 舒中俊,贾文娜,陈南,等. 交联聚乙烯塑料电缆绝缘失效的实验研究[J]. 消防科学与技术, 2009, 28(11): 795-799.
- [4] 张美丽,徐培娜. 空空导弹电缆网工程化技术研究[J]. 科技资讯, 2014(6): 121-123
- [5] 高玉水,李正优,徐振辉. 某型导弹电缆网绝缘电阻测试仪[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(6): 816-817.
- [6] 周辉. 谈电线电缆绝缘电阻的测试[J]. 中国计量, 2003(6): 62.
- [7] 马春排. 绝缘电阻数字化测量的研究[J]. 中国仪器仪表, 2002(1): 7-8.
- [8] 舒中俊,冯俊峰. PVC 电缆及其护套原料燃烧性能的对比如[J]. 消防科学与技术, 2006, 25(2): 247-249.
- [9] 王蔚,张和平,万玉田. 基于锥形量热仪的 PVC 电缆燃烧性能试验研究[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(2): 117-120.
- [10] 孙传友,孙晓斌. 测控系统原理与设计[M]. 第2版. 北京:北京航空航天大学出版社, 2007.