

文章编号:1001-5078(2021)05-0629-05

· 光电技术与系统 ·

弹载激光探测器加速寿命试验与评估研究

周小燕, 梁晨宇, 姜超, 钱煜, 孔繁林, 袁璠, 路小龙, 郭雨航
(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要:为满足弹载激光探测器贮存寿命评估的实际需求,研究了适用于激光探测器的加速寿命试验与寿命评估方法。首先,研究影响激光探测器的贮存寿命的因素,提出加速试验方案中应力范围、寿命分布类型、应力施加方式、试验时间等因素设计准则,其次基于极大似然法计算加速模型参数,通过寿命分布类型检验判定加速试验方案的合理性,最后利用加速因子折合寿命试验数据,实现贮存寿命评估,本文研究内容为激光探测器贮存寿命评估提供借鉴。

关键词:弹载;激光探测器;加速贮存寿命试验;温度应力;可靠寿命

中图分类号:TJ765.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.05.014

Study on accelerated life test and evaluation of missile borne laser detectors

ZHOU Xiao-yan, LIANG Chen-yu, JIANG Chao, QIAN Yu, KONG Fan-lin,
YUAN Liu, LU Xiao-long, GUO Yu-hang
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to evaluate the storage life of missile borne laser detectors, the research on accelerated lifetime test (ALT) and life evaluation method were carried out, which are applied for photoelectric detector. First, factors that affect the storage life of photoelectric detector were analyzed, stress level, distribution of storage life, stress order and test time were designed. Then, the method of parameter evaluation based on accelerated model and maximum likelihood estimation (MLE) were proposed, and the method to estimate the effectiveness of ALT based on distribution test was given. Finally, using acceleration factor to transform the storage life testing data, the storage life evaluation was provided. The research of the paper can be used as a reference for photoelectric detectors of the same type.

Keywords: missile borne; laser detector; accelerated storage life test; temperature stress; reliable life

1 引言

弹载激光探测器的主要作用是将探测到目标反射的激光信号转化成电信号,供系统后续电路处理目标的位置信息或距离信息,随着作战任务的结束而消亡。是系统的核心器件。其质量可靠

性指标是智能弹药系统质量可靠性保障不可缺少的环节之一。对于弹载激光探测器“长期贮存、一次使用”的寿命特点,若采用常规方法,在正常应力下,长期跟踪产品贮存过程中的性能参数的变化情况,才能确定产品的贮存寿命规律。不仅需

要消耗大量的人力、物力和时间,实际上长期跟踪难以实现;且随着光电技术的迅速发展,产品升级换代较为频繁,新的替代产品已投入使用,同类产品贮存数据的可参考性受到影响。由于缺乏光电探测器贮存寿命规律的相关数据,不仅影响系统的定寿和延寿工作,而且增加了装备的使用风险。

解决这一矛盾的行之有效的方法就是开展加速寿命试验,采用加速寿命试验的方法,获得贮存特征参数的变化规律,通过统计分析等科学方法评估激光探测器的贮存寿命,为系统的定寿和延寿提供数据支持。

2 概 述

从 1957 年 Levenbach 发表“电容器的加速寿命试验”开始,尤其是 20 世纪 70 年代以来,加速寿命试验在加速模型的研究、统计推断方法方面取得了长足的进展,并在推断电子、机械等材料和器件的使用或贮存寿命方面,发挥了重要作用。多种产品经历了研制—使用—改进的过程,其贮存可靠性不断提高,贮存寿命一再延长。

我国在贮存寿命方面也开展了一系列工作,各类弹药从 20 世纪 60 年代开始进行现场贮存试验,获得了大量的贮存性能与贮存寿命数据,为现役导弹的可靠使用及后续导弹设计积累了大量信息。电子五所曾对近万只元器件在北京、桂林等地长期贮存试验,估算出国产一般半导体器件的贮存寿命可达 14 年或 14 年以上。

本文研究的激光探测器主要应用于智能弹药领域,具有“长期贮存、一次使用”的特点,随着作战任务的结束而消亡。一般情况下,贮存寿命要求不小于 12 年。

评估长寿命高可靠产品的贮存寿命需要的试验时间长、费用高。文献[1]指出加速寿命试验是解决寿命较长的产品寿命评估的有效途径。由于基础数据的缺乏和鲜有相关研究报道,本文研究适用于激光探测器的加速寿命试验设计方法,分析敏感应力、安全加速应力、应力敏感参数、试验剖面等^[2-4],以及加速寿命试验数据分析和处理的步骤和方法。关于激光探测器,文献[5]、[6]指出光电探测器的退化以暗电流增加为主要特征,文献[6]给出了硅雪崩光电探测器加速工作寿

命试验的试验方案及实施的思路和方法,文献[7]对弹用激光探测器交付安装后的失效模式和影响进行分析,文献[8]、[9]开展了探测器寿命试验测试方法等研究,为激光探测器贮存寿命评估研究提供重要的参考价值。

3 激光探测器加速贮存寿命试验方案

3.1 试验原理

加速寿命试验是在不改变失效机理的前提下,采用加大应力的方式来缩短试验时间的一种寿命试验方法。加大应力促使样品在较短的时间内失效,利用高应力水平下的寿命特征外推正常应力水平下的寿命特征,从而评估出正常贮存条件下的贮存寿命。

3.2 加速应力

激光探测器贮存过程中受到的应力有温度、湿度、振动和电应力。振动应力主要来自于转运过程中的运输振动,电应力主要来自于产品的定期检测,这两种应力微乎其微,可以忽略不计。因此贮存过程中受到的主要应力是温度应力和湿度应力。湿度应力主要是外观锈蚀、影响其引脚的可焊性,以及密封失效时,影响探测器内部芯片的工作气氛,使得性能恶化。由于弹载激光探测器均为气密封装器件,其漏率规定不大于 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{cm}^{-3}/\text{s}$ 。由于工艺水平的提高,库房正常存放 10 年的激光探测器漏率满足规定的要求,所以湿度应力不是影响其贮存寿命的主要应力。

综上所述,影响气密封装的激光探测器贮存寿命的主要应力是温度应力。

在进行加速寿命试验方案设计时,采用综合应力会加快性能参数的变化过程,但是引入过多应力会给试验实施和数学建模带来较大困难,综合以上分析,对激光探测器贮存寿命的加速试验设计,以温度为加速应力。

3.3 加速模型

以温度为加速应力时,常用阿伦尼斯模型描述产品内部物理化学变化过程与温度间关系,其特征寿命与温度关系的数学表达式:

$$\xi = Ae^{E_a/KT} \quad (1)$$

其中, ξ 为寿命特征参数,如中位寿命、平均寿命等; A 为常数,由试验确定,且 $A > 0$; E_a 为激活能,与材料有关,单位是 eV; K 为玻尔兹曼常数 8.617×10^{-5}

eV/K; T 为热力学温度, K。

从式(1)可以看出, 温度升高, 特征寿命减小, 即失效过程被加速, 温度 T_1 相对于温度 T_0 的加速系数见式:。

$$A_F = \exp\left[\frac{E_a}{K}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (2)$$

3.4 应力水平

综合效费比, 一般情况下, 采用三个应力水平进行加速寿命试验。在保证失效机理不变的情况下, 尽可能的选取最高的温度, 最高温度受工艺用主料和辅料、以及工艺制程的限制。

一般来说, 激光探测器产品规范中规定 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为最高贮存温度, 考虑工艺因素, 推荐三个加速应力水平: $90\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $100\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.5 应力施加方式

应力施加方式有恒定应力、序进应力和步进应力三种方式, 一般情况下, 样品数量充足、试验设备充分的条件下, 优先采用恒定应力加速寿命试验。激光探测器为长寿命高可靠产品, 为提高试验效率, 可采用步进应力步降施加方式进行加速试验^[10]。

3.6 试验时间

在试验时间设计上, 按照高应力下试验时间短、低应力下试验时间长的原则, 定时截尾和定数截尾相结合的方式, 每个应力下试验时间不小于 2000 h 或出现不少于 3 只样品失效, 转入下一阶段的试验。

3.7 样本量

样品数量为不小于 10 只。

3.8 测试要求

根据 GJB548B-2005 规定, 并结合实际情况, 设计测试间隔时间为 $(200 \pm 40)\text{ h}$, 测试为常温测试。

激光探测器的敏感参数为暗噪声和响应度, 为全面检测样品性能的变化情况, 加速寿命试验过程中中间测试的参数包括: 响应度、暗噪声等技术规范规定的光电参数。

3.9 失效判据

不满足产品规范规定的指标要求或变化率大于 30%, 则判定不合格。

4 加速寿命试验数据分析与处理方法

4.1 寿命分布类型

激光探测器属于半导体光电子器件, 具有高可

靠性长寿命特点, 寿命一般服从指数分布。本文假设激光探测器贮存寿命分布为指数分布, 后续对试验数据进行假设检验, 验证贮存寿命分布类型检验能否通过。

4.2 确定特征参数

由于试验方案采用步进应力步降施加方式, 除了最高试验应力, 其他应力下的试验数据为非全寿命试验数据, 不能直接用于计算, 为求解加速模型的参数, 采用极大似然法。极大似然法是一种非常重要的加速寿命试验数据分析方法, 由于极大似然法无法直接得到显示解, 需借助数值计算求得未知参数。

求解加速模型特征参数的步骤如下:

1) 试验数据转换

基于 Nelson 累积失效假定, 在应力 T_i 下工作 t_i 时间, 相当于在应力 T_j 下工作 t_j 时间:

$$\lambda_i t_i = \lambda_j t_j \quad (3)$$

在每个应力水平 T_i 下测试 q_i 次, 试验时间区间为 $[0, t_{i,1}]$, $[t'_{i,2}, t_{i,2}]$, $\dots$, $[t'_{i,l}, t_{i,l}]$, 截尾时间为 τ_i , 其中 $i = (1, 2, \dots, k)$, $l = (1, 2, \dots, q_i)$ 。

在 T_1 下的失效数据是寿命数据, 在 T_i ($i = 2, \dots, k$) 下实际试验时间与前面 $i-1$ 个应力下的试验时间有关, 失效数据不能作为寿命数据, 有必要将前面 $i-1$ 个应力下的试验时间折算到第 i 个应力下, 折算后, 应力 T_i 下的实际的试验区间为 $[t_{i,l}^*, t_{i,l}^*]$, 截尾时间为 τ_i^* , 见如下公式:

$$t_{i,l}^* = \begin{cases} t'_{i,l} & i = 1; l = 1, 2, \dots, q_i \\ \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j \frac{\tau_j}{\lambda_i} + t'_{i,l} & i = 2, 3, \dots, k; l = 1, 2, \dots, q_i \end{cases} \quad (4)$$

$$t_{i,l}^* = \begin{cases} t_{i,l} & i = 1; l = 1, 2, \dots, q_i \\ \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j \frac{\tau_j}{\lambda_i} + t_{i,l} & i = 2, 3, \dots, k; l = 1, 2, \dots, q_i \end{cases} \quad (5)$$

$$\tau_i^* = \begin{cases} \tau_i & i = 1 \\ \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j \frac{\tau_j}{\lambda_i} + \tau_i & i = 2, 3, \dots, k \end{cases} \quad (6)$$

2) 建立似然方程

似然函数见式(7)~式(10)。

$$l(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k) =$$

$$\prod_{i=1}^k \prod_{l=1}^{q_i} [F_i(t_{i,l}^*) - F_i(t'_{i,l}^*)]^{r_{i,l}} [1 - F_k(\tau_k^*)]^{n-Z_k}$$

$$= E \left\{ \prod_{i=1}^k \prod_{l=1}^{q_i} [\exp(-\lambda'_{i,l} t_{i,l}^*) - \exp(-\lambda_i t_{i,l}^*)]^{r_{i,l}} \right\} \cdot \exp[-(n - Z_k) \lambda_k \tau_k^*] \quad (7)$$

$$r_i = \sum_{l=1}^{q_i} r_{i,l} \quad (8)$$

$$Z_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (9)$$

$$E = \frac{n!}{\prod_{i=1}^k r_{i,1}! \cdots r_{i,q_i}! (n - Z_k)!} \quad (10)$$

式中, $r_{i,l}$ 为试验时间区间 $[t'_{i,l}, t_{i,l}]$ 内失效个数; r_i 为应力 T_i 下失效总数; Z_k 为试验至第 k 个应力时累积失效总数; E 为与参数无关的常数。

3) 求解加速模型参数

将加速模型作如下变换, 如式(11)所示:

$$\ln(\theta) = a + b/T \quad (11)$$

$$\lambda = 1/\theta \quad (12)$$

式中, θ 为平均寿命; a, b 为待估系数; T 为温度应力, 热力学温度; λ 为失效率。

将式(11)和式(12)代入式(7), 可采用牛顿法和模拟退火法对似然函数进行综合最优化数值计算, 得到 a, b 。

4.3 计算加速因子

将 a, b 代入式(11)求出温度 T 下的平均寿命 θ, T_1 对 T_0 的加速因子为:

$$AF = \theta_0/\theta_1 \quad (13)$$

4.4 寿命分布类型检验

指数分布检验采用 χ^2 检验法。如果原假设 H_0 :

$\lambda(t) = \lambda$ (常数) 成立, 则检验函数为:

$$Q = -2 \sum_{i=1}^r \ln \left[\frac{T(t_{(i)})}{T^*} \right] \sim \chi^2(2r) \quad (14)$$

式中, $T(t_{(i)})$ 为在 $t(i)$ 失效时刻前的累积总试验时间; T^* 为总试验时间; r 为失效数。

如果显著性水平为 α , 即:

$$Q \geq \chi_{1-\alpha}^2(2r) \quad (15)$$

则拒绝 H_0 , 即认为不服从指数分布。

激光探测器最高加速应力下的全寿命试验数据可直接采用 χ^2 检验法进行指数分布检验; 同时, 基于加速因子, 可将三个应力下的试验数据折合到某一应力下 (折合原理见图 1), 再进行指数分

布检验。

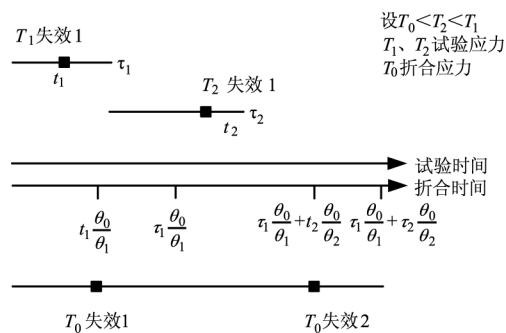


图 1 试验数据折合方法

Fig. 1 Test data conversion method

如果能通过指数分布检验, 表明贮存寿命服从指数分布, 且加速寿命试验未改变产品失效机理^[11]。否则表示寿命分布不服从指数分布或加速寿命试验改变了产品失效机理。

4.5 贮存寿命评估

激光探测器贮存寿命一般指正常贮存温度 25 °C 下的寿命。评估时, 基于加速因子将试验数据折合到 25 °C 下, 再根据式(16)^[12] 计算 25 °C 下可靠寿命单侧置信下限:

$$t_L(R) = \ln(1/R) \cdot 2T/\chi_{1-\alpha}^2(2r+2) \quad (16)$$

式中, R 为可靠度; $t_L(R)$ 为可靠寿命置信下限; T 为累积试验时间; $1 - \alpha$ 为置信度; r 为失效数。

若 $t_L(R) \geq$ 指标要求, 则表明产品贮存寿命能够满足系统要求。

5 结论

本文研究了弹载激光探测器的加速寿命试验与寿命评估方法, 提出了加速试验方案中应力水平、应力施加方式、试验时间等因素设计准则, 为激光探测器加速贮存寿命试验设计提供了依据。基于极大似然法、加速模型、数值分析等, 给出了弹载激光探测器加速寿命试验数据统计分析的系统方法, 实现了加速模型参数估计和可靠贮存寿命评估, 为智能弹药系统的可靠性、维修性和保障性提供数据支持, 对同类激光探测器贮存寿命评估方法研究具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] Li Xiaoyang, Jiang Tongmin. Review of multiple-stress models in accelerated life testing[J]. System Engineering and Electronics, 2007, 29(5): 828 - 831. (in Chinese)
李晓阳, 姜同敏. 加速寿命试验中多应力加速模型综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(5): 828 - 831.

- [2] Luo Min, Jiang Tongmin. Reliability enhancement testing technology for safe acceleration range[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(1): 79–83. (in Chinese)
罗敏, 姜同敏. 用于产品安全加速范围的可靠性强化试验技术[J]. 兵工学报, 2010, 31(1): 79–83.
- [3] Wang Yahui, Li Xiaogang. Study of Li-ion cell accelerated test based on degradation path. Equipment Environmental Engineering[J]. 2013, 10(2): 30–33, 95. (in Chinese)
王亚辉, 李晓钢. 基于退化轨迹的锂离子电池加速试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 30–33, 95.
- [4] He Ronghua, Zhang Ya, Li Bo, et al. Research program of reliability enhancement test about military electronic components[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(18): 5461–5464. (in Chinese)
何荣华, 张亚, 李波, 等. 军用电子元件的可靠性强化试验方案研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(18): 5461–5464.
- [5] Xie Jinshan. Reliability theory of photodetectors for optical fiber communication system[J]. Semiconductor Optoelectronics. 1990, 11(2): 171–181. (in Chinese)
解金山. 光纤通信系统中光电探测器可靠性理论[J]. 半导体光电, 1990, 11(2): 171–181.
- [6] Zhou Xiaoyan, He Wei, Liang Chenyu, et al. The application research of accelerated working life test for silicon avalanche photoelectric detector[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(16): 199–201, 211. (in Chinese)
周小燕, 何伟, 梁晨宇, 等. 硅雪崩光电探测器加速工作寿命试验应用研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(16): 199–201, 211.
- [7] Li Yubao, Liu Bin, Deng Min, et al. Failure mode analysis and precaution study of missile-borne laser detector[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(3): 185–188. (in Chinese)
李玉宝, 刘兵, 邓敏, 等. 弹载激光探测器失效模式分析及预防措施研究[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(3): 185–188.
- [8] Cao Lan, Zhang Haiyan, Gong Haimei. Design of vacuum system for infrared detector life test equipment[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(8): 931–933. (in Chinese)
曹岚, 张海燕, 龚海梅. 红外探测器寿命试验设备真空系统研制[J]. 激光与红外, 2015, 45(8): 931–933.
- [9] Su Meikai, Gao Zhiyun, Zuo Fang, et al. Study on the method of laser diode life testing[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(2): 124–127. (in Chinese)
苏美开, 高雅允, 左方, 等. 激光二极管寿命测试方法研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(2): 124–127.
- [10] Zhang Chunhua. Theory and method of step-down-stress accelerated life testing[D]. National University of Defense Technology. (in Chinese)
张春华. 步降应力加速寿命试验的理论和方法[D]. 国防科学技术大学, 2002.
- [11] Zhou Yuanquan, Weng Zhaoxi, Ye Xitao. The conditions of accelerated factor and constant failure mechanism (I)—the condition of continuous distribution[J]. Systems Engineering and Electronics, 1996, 18(1): 55–67. (in Chinese)
周源泉, 翁朝曦, 叶喜涛. 论加速系数与失效机理不变的条件(I)—寿命型随机变量的情况[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 18(1): 55–67.
- [12] Zhao Yu, Yang Jun, Ma Xiaobing. Reliability data analysis[M]. Beijing: Beihang University Press, 2009. (in Chinese)
赵宇, 杨军, 马小兵. 可靠性数据分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.