

基于步进应力的火工品加速贮存试验研究

王亚辉, 李晓钢

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对火工品长寿命、高可靠的特点,在长期贮存的条件下,评估其贮存可靠性是非常困难的。以步进应力加速贮存寿命试验方法评估了火工品的贮存可靠性,然后再把步进应力加速贮存寿命试验下的数据折算为恒定应力下的失效数据。根据其贮存寿命服从对数正态分布的规律进行统计分析,进而推算正常应力下火工品的贮存寿命。

关键词: 火工品; 步进应力; 加速贮存寿命试验; 恒定应力; 对数正态分布

中图分类号: TJ45 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)01-0038-03

Study on Accelerated Storage Life Test of Initiating Explosive Device Based on Step Stress Method

WANG Ya-hui, LI Xiao-gang

(School of Reliability and System Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: It is very difficult to assess the storage reliability of initiating explosive device under long term storage condition considering its characteristics of long life and high reliability. A step stress accelerated storage life test method to assess the storage reliability of initiating explosive device was put forward, and then converted the data under the step stress accelerated storage life test to the data under the constant stress accelerated storage life test. The storage life of initiating explosive device under the normal stress was analyzed and calculated based on lognormal distribution.

Key words: initiating explosive device; step stress; accelerated storage life test; constant stress; lognormal distribution

火工品是武器系统中非常重要的一个子系统,它主要应用于各种武器系统和航空航天飞行器中,提供点火、起爆、特定动力能源及特种效应等功能。虽然只是一个辅助装置,但是一个火工品的失效就有可能影响整个武器系统的正常使用,甚至会给一次飞行任务或一场战斗带来致命的影响。因

此对火工品的可靠性研究具有重要的理论意义和实用价值,在整个国防、国民经济发展中占有不可忽视的地位。

火工品具有长期贮存、一次使用的特点,即在全寿命周期的绝大多数时间内,火工品都处于贮存或不工作状态,因此火工品贮存寿命和贮存可靠性都

收稿日期: 2012-08-07

作者简介: 王亚辉(1987—),男,河南漯河人,硕士研究生,主要研究方向为可靠性与环境试验技术。

是重要的技术指标。同时火工品又具有长寿命的特点,如果采用在常规试验条件下做寿命试验的方法对其寿命特征进行评估,往往需要耗费很长的时间,甚至还来不及做完寿命试验,该火工品就会因为性能落后而被淘汰,所以考虑采用加速贮存寿命试验的方法评估其贮存可靠性。在加速贮存寿命试验中,虽然恒定应力的试验方法在一定程度上起了加速作用,但是所需的时间还是相对比较长,且所需的试验样本也比较多。因此采用步进应力的加速贮存寿命试验方法对火工品的贮存可靠性进行评估,并在步进应力试验的基础上,把失效数据折算为每个加速应力水平下的寿命数据,最后利用寿命数据的分布,推算正常应力下火工品的贮存寿命。

1 薄弱环节和敏感环境应力分析

1.1 火工品贮存期的敏感环境应力

研究表明,火工品的贮存失效主要是由两个方面引起的,即内在因素和外在因素。内在因素是指火工品装置装药的内在性能和结构,外在因素则是指贮存期中的环境条件,主要是温度和湿度^[1-2]。GJB 736.8—1991 等有关资料表明,火工品在自然贮存条件下,主要受温、湿度的影响^[3]。然而,目前在火工品的设计和生产中,对湿度的控制比较严格,装置结构的密封性也都达到了标准要求。因此,在火工品的贮存过程中,确定敏感应力为温度应力^[4]。

1.2 步进加速贮存寿命试验的基本假设

根据相关研究表明,为了便于对寿命数据进行统计分析,在进行步进应力加速贮存寿命试验之前,提出以下4个假定^[5]。

1) 在应力水平 S_i 下,产品寿命服从对数正态分布 $LN(\mu_i, \sigma_i^2)$, $i=0, 1, \dots, k$ 。

2) 在各应力水平 S_i 下,产品的失效机理不变,分布中的形状参数相等,即 $\sigma_0 = \sigma_1 = \dots = \sigma_k = \sigma$ 。

3) 分布参数 μ_i 与所加应力水平 S_i 满足加速方程,见式(1)。

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

式中: a, b 为待估参数; $\varphi(S_i)$ 为已知函数。

4) 产品的剩余寿命只与已累计失效部分和当

前应力水平有关,而与累计方式无关。

1.3 加速模型

根据第1.1节分析知,火工品的敏感应力为温度应力,研究表明,当加速应力为温度应力时,选用 Arrhenius 模型。又因为火工品的贮存寿命分布为对数正态分布,所以选用中位寿命 $t_{i,0.5}$ 为寿命特征,见式(2)。

$$t_{i,0.5} = Ae^{E/KT} \quad (2)$$

式中: $t_{i,0.5}$ 为火工品的中位寿命; E 为激活能,与材料有关, eV; K 为波尔兹曼常数, $K=1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T 为热力学温度, K; A 为常数。

2 步进应力加速贮存寿命试验的确立

2.1 试验设计

根据 GJB 736.14—1991 等相关文献表明^[6],在对火工品做加速试验时,最低加速温度应不低于 323 K,最高加速温度不高于 363 K。因此在 323~363 K 中选择4个加速应力 S_1, S_2, S_3, S_4 , 相邻两个应力间相差 10 K。把一定数量的试样全部置于最低应力 S_1 下进行试验,经检测出现一定数量的失效样品(或一定的试验时间)时,进行下一应力的试验;依次类推,直到在最高应力 S_4 下也达到规定的失效数(或一定的试验时间)时,停止试验,如图1所示。

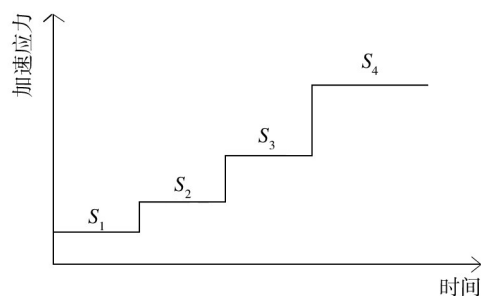


图1 步进应力试验

Fig. 1 Step stress test

2.2 数据折算

步进应力加速贮存寿命试验中,除了在最低应力 S_1 下的失效数据是真实的寿命数据外,其他应力下的寿命数据都比真实数据要小,原因是在此应力

之前有累积失效发生。为了便于在步进应力加速贮存试验后进行数据的统计,应对步进应力试验下的数据进行折算处理,转化为恒定应力加速贮存寿命试验下的数据。步进应力加速贮存寿命试验的数据折算公式见式(3),把在应力水平 $S_i(i \geq 2)$ 之前的累积失效都折算到 S_i 上,进而得到在应力水平 S_i 下的真实寿命数据^[7]。

$$\sum_{l=1}^{i-1} \tau_{li} = \sum_{l=1}^{i-1} e^{(\mu_i - \mu_l)} \tau_l = \sum_{l=1}^{i-1} e^{b(\varphi_i - \varphi_l)} \tau_l \quad (3)$$

式中: τ_{li} 为在应力水平 S_i 下的工作时间 τ_l 折算到应力水平 S_i 下的时间。由假定条件可知, $\mu_i = \ln t_{i,0.5} = a + b\varphi(S_i)$, $\mu_l = \ln t_{l,0.5} = a + b\varphi(S_l)$, $\varphi_i = \varphi(S_i)$, $\varphi_l = \varphi(S_l)$ 。

获得折算时间,可以得出产品在每个应力水平 $S_i(i \geq 2)$ 下的真实寿命数据,见式(4)。

$$\hat{t}_{ij} = t_{ij} + \sum_{l=1}^{i-1} e^{b(\varphi_i - \varphi_l)} \tau_l \quad (4)$$

式中: $i=0, 1, \dots, k; j=1, 2, \dots, \tau_{i0}$ 。

3 火工品贮存寿命的统计分析

根据第2.2节对火工品的贮存失效数据进行折算,可以得到在每个应力水平下的真实寿命数据,即相当于在恒定加速应力下的寿命数据。假设在步进应力加速贮存寿命试验中,是按定时截尾的方式测试失效数据的。把折算每个应力水平 S_i 下的真实寿命数据取自然对数,并按从大到小的顺序依次排列。

在每个应力水平 S_i 下,当失效的产品数不同时,采取不同的估计方法。 r_i 为失效产品数,当 $r_i \leq 20$ 时,采用BLUE(最优线性无偏估计)估计出 $\hat{\mu}_i$ 和 $\hat{\sigma}_i$;当 $r_i \geq 20$ 时,采用GLUE(简单线性无偏估计)估计出 $\hat{\mu}_i$ 和 $\hat{\sigma}_i$ 。

由假定可知 $\mu_i = a + b\varphi(S_i)$, $i=0, 1, \dots, k$,其中 μ_i 等于火工品的中位寿命再取自然对数。因为已经得到 μ_i 和 σ_i 的估计值,所以使用最小二乘估计得

出 \hat{a}, \hat{b} 的值,见式(5)、式(6)。

$$\hat{a} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \hat{\mu}_i - \hat{b} \left(\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \varphi_i \right) \quad (5)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^k \varphi_i \hat{\mu}_i - \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k \varphi_i \right) \left(\sum_{i=1}^k \hat{\mu}_i \right)}{\sum_{i=1}^k \varphi_i^2 - \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k \varphi_i \right)^2} \quad (6)$$

可以得到 $\hat{\mu}_i = \hat{a} + \hat{b}\varphi_i$,由加速方程推算出在正常应力水平 S_0 的火工品贮存寿命加速方程为 $\hat{\mu}_0 = \hat{a} + \hat{b}\varphi_0$ 。因此,可以得到火工品的中位寿命,见式(7)。

$$t_{0.5} = e^{\hat{a} + \hat{b}\varphi_0} \quad (7)$$

4 结论

提出了应用步进应力加速贮存寿命试验的方法来评估火工品的贮存寿命,并把失效数据折算为恒定应力加速贮存寿命试验数据,使试样数量减少,试验时间缩短,对于提高火工品的贮存能力,节省军费开支具有重要的意义。

参考文献:

[1] 李东阳. 火工品贮存失效情况分析[J]. 火工品, 1996, 28(2): 28—30.
 [2] 赵伟. 火工品失效模式[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(7): 14—16.
 [3] GJB 736.8—1991, 火工品试验方法 71 °C试验法[S].
 [4] 赵婉. 航天火工装置步进应力加速贮存寿命试验方法研究[J]. 火工品, 1996, 28(3): 28—30.
 [5] 崑诗松. 加速寿命试验[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 172—173.
 [6] GJB 736.14—1991, 火工品试验方法 长期贮存寿命测定[S].
 [7] 赵宇. 可靠性数据分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 192—194.

(上接第21页)

[4] 郑卫京, 罗永禄. 火电厂烟气脱硫装置腐蚀与防护[J]. 电力环境保护, 1999, 15(2): 23.
 [5] 朱日彰. 金属腐蚀学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989: 193—194.

[6] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005: 56—68.
 [7] ROBERGE P R, KLASSEN R D, HABERECHE P W. Atmospheric Corrosivity Modeling—A Review[J]. Materials & Design, 2002, 23(3): 321—326.