

文章编号: 1006-9941(2015)11-1130-05

# 飞行器火工品加速贮存寿命试验与评估方法

赵长见<sup>1,2</sup>, 洪东跑<sup>2</sup>, 管飞<sup>1,2</sup>, 张海瑞<sup>1,2</sup>

(1. 国防科学技术大学航天科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘要:** 飞行器火工品是一种高可靠长寿命产品, 为提高小样本量下飞行器火工品贮存寿命评估精度, 通过对贮存寿命影响因素进行分析, 建立了加速贮存寿命模型以描述火工品贮存寿命与贮存温度的关系, 并将感度试验和加速试验相结合, 给出了一种适用于飞行器火工品的加速贮存寿命试验与评估方法。依据火工品加速后的感度试验数据, 基于广义线性模型给出了感度分布参数的极大似然估计, 进而根据参数估计的渐近正态特性对飞行器火工品进行了贮存寿命评估。将该方法应用于某飞行器火工品。通过利用样本量约为 150、周期约为 40 天的试验获得的数据, 可对贮存寿命要求为 15 年以上的飞行器火工品进行有效评估。

**关键词:** 飞行器设计; 火工品; 加速贮存寿命试验; 感度试验; 广义线性模型

**中图分类号:** TJ4; TB114.3

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.018

## 1 引言

火工品是装有火药或炸药, 受外界能量刺激后产生燃烧或爆炸, 用以引燃火药、引爆炸药、做机械功或产生特种效应的一次性使用的元件和装置的总称<sup>[1]</sup>, 广泛应用于飞行器领域。飞行器火工品承担着一系列有关固体发动机点火、姿态控制、分离等飞行器飞行过程中控制指令的执行, 对飞行器飞行成败起到关键性的作用, 需要对飞行器火工品贮存寿命进行有效地评估。

飞行器火工品在贮存过程中受到环境因素的影响, 其可靠性会逐渐降低。由于飞行器火工品可靠性高, 正常贮存条件下其失效率很低, 短期内很难暴露出缺陷, 无法得到有效的贮存寿命信息, 故需要通过开展加速贮存寿命试验, 对火工品贮存寿命进行评估<sup>[2]</sup>。目前加速寿命试验理论与方法已较为成熟, 普遍应用于飞行器上的电子、材料等产品。然而, 火工品属于一种含药元件或装置, 其失效时间不可测。通过测试只能判断在一定贮存时间后其是否失效<sup>[3-4]</sup>, 而且每个样本只能测试一次。如按传统的加速寿命试验理论与方法, 则试验样本需求巨大, 试验经费和周期难以满足工程要求。国内外学者通过研究给出了适合火工品的

加速寿命试验方法<sup>[5-6]</sup>, 极大地减少了试验样本量。71℃试验法是国内工程中常用的一种火工品加速贮存寿命试验方法, 利用加速系数, 由高温下的试验时间, 推算常温下的贮存寿命<sup>[5]</sup>。对于不同类别的火工品, 活化能可能存在一定的差异, 进而加速系数也不完全一致, 影响了贮存寿命评估的精确性。美国航天航空工业协会发布的火工品加速贮存寿命试验方法也是一种利用加速系数的小样本试验方法<sup>[6]</sup>。该方法需要在加速试验前后进行感度参数一致性检验, 作为贮存寿命是否满足要求的评判标准。由于飞行器火工品具有长寿命、高可靠的特点, 可能在加速贮存后感度参数发生了退化不能通过一致性检验, 但可靠性依然满足指标要求。如果以一致性检验结果作为唯一的评判标准, 则会导致贮存寿命评估结果与实际存在较大偏差。

针对现有火工品加速贮存寿命试验方法存在的不足, 本研究结合飞行器火工品及其贮存寿命与可靠性的特点, 对飞行器火工品贮存寿命影响因素、失效模式与失效机理进行分析, 将感度试验与加速贮存试验相结合, 利用可靠性评估来代替感度参数一致性检验, 给出一种适用于飞行器火工品的加速贮存寿命试验与评估方法, 在较小样本量下, 有效提高火工品贮存寿命试验与评估的精确性与稳健性。

## 2 贮存失效分析

在长期贮存中常常会因受到各种环境的影响, 在

收稿日期: 2015-01-07; 修回日期: 2015-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助(61104133)

作者简介: 赵长见(1977-), 男, 研究员, 主要从事飞行器设计研究。

e-mail: zhaosun@sina.com

通信联系人: 洪东跑(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事可靠性工程研究。e-mail: hloving@163.com

飞行器火工品内部发生物理变化和化学变化,导致其性能逐渐退化到不能完成其预定设计功能的状态而发生失效。火工品失效是指其不能完成或将不能完成其设计功能的事件或状态,按失效性质分为功能失效和材料失效两类<sup>[6]</sup>。

根据飞行器火工品的结构及功能特点,可以分为电点火(起爆)器类、爆炸螺栓类、固体小火箭类和隔板点火器类四大类<sup>[6]</sup>。同类产品的结构、工作原理、设计控制措施及方法相似,因此以典型产品为代表进行该类火工品的贮存失效模式分析。

**电点火(起爆)器类:**对电点火(起爆)器类产品进行失效分析可知,导致电性能变化、输出性能超差以及外观问题等故障的原因,最终可以归结到金属材料腐蚀、非金属材料老化和药剂失效三个方面,而导致三种现象出现的环境因素为温度、湿度、盐雾和霉菌。

**爆炸螺栓类:**对爆炸螺栓类产品失效进行分析可知,爆炸螺栓除包含电发火管失效的各因素外,还包括螺栓头和隔板装药体部分性能超差的问题,最终也可以归结到金属材料腐蚀、非金属材料老化和药剂失效三方面,而导致三种现象出现的环境因素为温度、湿度、盐雾和霉菌。

**火箭类:**对火箭类产品进行失效分析可知,导致火箭类火工品贮存性能失效的原因除电发火管失效的各因素外,还包括火箭类火工品部分性能超差的问题,最终也可以归结到金属材料腐蚀、非金属材料老化、药剂或药柱失效三方面,而导致三种现象出现的环境因素为温度、湿度、盐雾和霉菌。

**隔板点火器类:**对隔板点火器类产品失效进行分析可知,隔板点火器除包含电发火管失效的各因素外,还包括隔板装药体部分性能超差的问题,最终也可以归结到金属材料腐蚀、非金属材料老化、药剂失效三方面,而导致三种现象出现的环境因素为温度、湿度、盐雾和霉菌。

通过对飞行器火工品常用的失效模式与失效机理进行分析可知,飞行器火工品装药的内在性能和结构是决定其贮存失效的内在原因,环境温度、湿度、盐雾和霉菌是影响其贮存性能的重要的外在因素。飞行器火工品在设计与生产过程中对于湿度的控制都比较严格,结构上可确保密封性能达到要求,同时飞行器的贮存环境较好,火工品受盐雾和霉菌影响较小。这样在飞行器火工品密封良好、装药和结构既定的情况下,环境温度变化是引起飞行器火工品药剂理化性能改变进而造成飞行器火工品贮存失效的主要因素。因此在飞

行器火工品的加速寿命试验中,通常采用温度作为加速应力。

### 3 加速贮存寿命试验

在贮存过程中火工品的失效往往是由多种失效机理引起的,是多个退化过程同时发生的结果,但整个退化反应的速度取决于最快的过程。一般来讲,当对材料、产品有害的反应持续到一定限度,失效即随之发生,这样的模型就是反应速度论模型<sup>[3]</sup>。这种反应速度  $k$  与温度  $T$  的关系可以用经典的阿伦尼斯模型来描述<sup>[3]</sup>:

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

式中,  $A$  为与产品特性有关的正常数,  $E_a$  为活化能, eV; 波尔兹曼常数  $R = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

对于不同类别的火工品,活化能  $E_a$  可能存在一定的差异,因而加速系数也不完全一致。当火工品样本量足够时,可选择经典的恒定温度应力试验法。以阿伦尼斯方程作为火工品寿命与温度关系的数学模型,通过至少四个温度应力水平的加速寿命试验求出加速系数,由此外推算温下的贮存寿命。然而,针对火工品不可重复测试、无法确定失效时间等特点,经典的加速寿命试验方法难以适用。

鉴于 71 °C 试验法和恒定温度加速寿命试验法的局限性,当飞行器火工品平贮件样本量较少时,可利用在美国航天航空工业协会发布火工品加速寿命试验方法<sup>[6]</sup>,其加速方程为:

$$\frac{\theta_0}{\theta_1} = 3^{\left(\frac{T_1 - T_0}{11.1}\right)} \quad (2)$$

式中,  $\theta_0$  为火工品的正常贮存寿命,  $\theta_1$  为加速贮存寿命,  $T_0$  为火工品的正常贮存温度, K;  $T_1$  为火工品的加速试验温度, K。在工程应用中,一般先确定加速贮存时间  $\theta_1$ ,再选取样本量  $n$  的产品在高温  $T_1$  下进行加速贮存试验,对加速贮存试验后的产品进行感度试验,由感度试验数据产品试验前后性能参数的一致性进行检验。如果一致性检验通过,则认为该火工品在高温  $T_1$  下贮存寿命大于  $\theta_1$ ,由加速系数可推导出该产品在正常贮存温度  $T_0$  的寿命大于  $\theta_0$ 。如果一致性检验不通过,则需要降低加速贮存时间  $\theta_1$ ,重新选取一批新产品进行试验。针对感度参数一致性检验存在的不足,利用可靠性评估来代替感度参数一致性检验,如果加速试验后产品的可靠性评估符合指标要求,则可认为火工品贮存寿命满足要求。

根据飞行器火工品贮存任务剖面确定正常贮存温度  $T_0$ , 通常飞行器火工品的贮存温度要求为区间形式, 即  $[T_L, T_H]$ 。通过对飞行器火工品的贮存失效模式与失效机理进行分析可知, 贮存温度越高贮存寿命越小, 从保守上考虑, 可取贮存温度上限作为加速试验中的正常贮存温度, 即  $T_0 = T_H$ 。

结合飞行器火工品的贮存寿命  $\theta_0$  和试验周期合理确定加速贮存试验温度  $T_1$ ,  $T_1$  越高, 加速贮存试验时间越短, 但  $T_1$  的选取应保持贮存失效机理不变, 通常比极限贮存温度低 10 ~ 20 K。

在确定贮存寿命  $\theta_0$ , 贮存温度  $T_0$  和加速贮存试验温度  $T_1$  后, 由式(2)可确定加速贮存试验时间  $\theta_1$ 。已知加速试验温度和时间, 选取样本量为  $n$  的飞行器火工品进行加速贮存试验。

#### 4 贮存寿命评估

为对飞行器火工品贮存寿命进行评估, 需要对加速后的产品开展感度试验, 以获取感度试验相关数据。升降法是工程上常用的火工品感度试验方法<sup>[8-9]</sup>。升降法的试验方案包括三个因素: 试验量  $n$ 、初始刺激量  $x_0$  和步长  $d$ 。在  $x_0$  和  $d$  选定后, 用  $x_0$  作第一次刺激-响应试验; 第二次及以后每次试验所用刺激量的取法如下: 如前一次试验的反应结果为“响应”, 则本次试验用刺激量为  $x_{i+1} = x_i - d$ ; 如为“不响应”, 则为  $x_{i+1} = x_i + d$ 。如此循环试验, 至完成预定试验量  $n$  为止。

对加速后的飞行器火工品进行升降法感度试验。升降法试验方案会直接影响感度分布参数的估计结果, 根据文献[10]研究结果, 假设感度服从正态分布  $X \sim N(\mu, \sigma)$ , 可利用加速试验前火工品的感度分布参数估计结果  $(\mu_0, \sigma_0)$  来确定升降法试验方案。取样本量  $n_0$ , 初始刺激量  $x_0 = \mu_0$ , 试验步长  $d = \sigma_0$ 。利用该方案, 对加速试验后的火工品进行升降法试验。对升降法试验数据进行统计分析, 按刺激量的升序排列, 可表示成如下通用形式:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1, x_2, \dots, x_s \\ n_1, n_2, \dots, n_s \\ m_1, m_2, \dots, m_s \end{array} \right\} \quad (3)$$

其中  $s$  为刺激量个数,  $x_i (i=1, 2, \dots, s)$  为试验刺激量,  $m_i$  为在  $x_i$  试验的失效数,  $n_i$  为在  $x_i$  试验的成功数。

火工品常用的感度分布为正态分布、对数正态分布、Logistic 分布和对数 Logistic 分布, 其中对数正态分布和对数 Logistic 分布可通过对数变换, 分别转换

为正态分布和 Logistic 分布。故火工品感度分布函数可统一表示为  $G\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$ , 如果  $X$  服从正态分布, 则  $G(\cdot)$  为标准正态分布函数,  $G(t) = \Phi(t)$ ; 如果  $X$  服从 Logistic 分布, 则  $G(\cdot)$  为标准 Logistic 分布函数,  $G(t) = \frac{\exp(t)}{1+\exp(t)}$ 。结合式(3)的感度试验数据可得似然函数:

$$L = \prod_{i=1}^s C_i \left[ G\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right) \right]^{n_i} \left[ 1 - G\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right) \right]^{m_i} \quad (4)$$

由式(4)的似然函数可以求得感度分布参数  $\mu$  和  $\sigma$  的极大似然估计。由于没有解析解, 一般利用解非线性方程组的数值方法来求解。为增强对感度试验数据的适应性并改善参数估计效率, 可利用广义线性模型求解未知参数的极大似然估计。令  $\beta_1 = -\frac{\mu}{\sigma}, \beta_2 = \frac{1}{\sigma}$ , 则感度分布函数可变为  $G(\beta_1 + \beta_2 x)$ , 代入式(4)可得对数似然函数:

$$l = \sum_{i=1}^s \{ n_i \ln [ G(\beta_1 + \beta_2 x_i) ] + m_i \ln [ 1 - G(\beta_1 + \beta_2 x_i) ] \} \quad (5)$$

式(5)对数似然函数可看成连接函数为  $G(\beta_1 + \beta_2 x)$  的二项分布变量的广义线性表达式<sup>[11]</sup>, 此时可利用二项分布广义线性模型来获得参数  $\beta = (\beta_1, \beta_2)^T$  的极大似然估计。有研究表明<sup>[12]</sup>, 利用广义线性模型的火工品可靠性评估方法具有较高的精度, 能满足火工品高可靠性要求。当火工品感度服从正态分布, 取连接函数为  $G(\beta_1 + \beta_2 x) = \Phi(\beta_1 + \beta_2 x)$ ; 当感度服从 Logistic 分布时, 取连接函数为  $G(\beta_1 + \beta_2 x) = \frac{\exp(\beta_1 + \beta_2 x)}{1 + \exp(\beta_1 + \beta_2 x)}$ 。已知参数估计  $\hat{\beta}$ , 可得感度分布参数估计  $\hat{\sigma} = \frac{1}{\hat{\beta}_2}$  和  $\hat{\mu} = -\frac{\hat{\beta}_1}{\hat{\beta}_2}$ 。

给定工作刺激量  $x$ , 已知感度分布参数估计  $(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$  可得火工品的可靠度估计:

$$\hat{R}(x) = G\left(\frac{x - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right) \quad (6)$$

根据感度分布参数极大似然估计  $\hat{\beta}$  的渐近正态性, 记  $h(\beta)$  为  $\beta$  的函数, 则有

$$\frac{h(\hat{\beta}) - h(\beta)}{\sqrt{J_h(\hat{\beta})^{-1} I^{-1} J_h(\hat{\beta})}} \sim N(0, 1) \quad (7)$$

式中,  $I(\hat{\beta})$  为 Fisher 信息矩阵的估计,  $J_h(\beta) = \left( \frac{\partial h(\beta)}{\partial \beta_1}, \frac{\partial h(\beta)}{\partial \beta_2} \right)^T$ , 利用式(7)可得  $h(\beta)$  的近似区间

估计<sup>[13]</sup>。取  $h(\beta) = \ln \left[ \frac{R(x)}{1-R(x)} \right]$ , 给定置信水平  $1-\alpha$ , 可得火工品在工作刺激量  $x$  的置信下限

$$R_L(x) = \left[ 1 + \frac{1-R(x)}{R(x)} \exp(z_{1-\alpha} \sigma_h) \right]^{-1} \quad (8)$$

式(8)中,  $\sigma_h = \sqrt{J_h^T(\hat{\beta}) I^{-1} J_h(\hat{\beta})}$ ,  $z_{1-\alpha}$  为标准正态分布的  $1-\alpha$  分位点。如果  $R_L(x)$  大于飞行器火工品可靠性指标要求, 则可认为该火工品贮存寿命满足要求。

### 5 算例

某飞行器火工品贮存寿命与可靠性要求为: 置信水平  $\gamma=0.95$ , 可靠度  $R \geq 0.999$ , 工作刺激量为  $6 \text{ cm}$ , 贮存温度为  $5 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ , 贮存寿命不低于  $15 \text{ a}$ 。

由于贮存温度与贮存寿命成反比, 从保守上考虑, 取  $35^\circ\text{C}$  作为加速试验中的正常贮存温度。对该火工品进行分析可知, 其极限温度为  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 故取  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  作为加速贮存温度。由式计算可得加速贮存时间为  $38.8 \text{ d}$ , 可令加速贮存时间为  $39 \text{ d}$ 。选取一定样本量的火工品, 在  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  的条件下, 进行为期  $39 \text{ d}$  的试验。待加速贮存试验后, 利用升降法感度试验。

由文献[12]可知, 该火工品感度服从对数正态分布, 综合利用三组升降法试验数据进行可靠性评估, 可得感度分布参数的估计为  $(\hat{\mu}=0.734, \hat{\sigma}=0.22)$ , 可靠性置信下限为  $0.9996$ , 该火工品的可靠性达到了指标要求。通过与利用大样本步进法试验数据分析结果进行对比可知该评估结果较为精确。为此, 可假设该火工品的感度分布参数为  $(\mu_0=0.734, \sigma_0=0.22)$ 。由于火工品在贮存过程中, 临界刺激量随贮存时间递增, 而感度分布类型不变。当感度服从对数正态分布时, 位置参数  $\mu$  随贮存时间递增, 而刻度参数  $\sigma$  随贮存时间变化很小。为了便于进行数值模拟, 假设该火工品加速试验后的感度分布参数为  $(\mu_1=0.80, \sigma_1=0.22)$ , 其中位置参数  $\mu$  由  $0.734$  变为  $0.80$ , 而刻度参数  $\sigma$  保持  $0.22$  不变。利用蒙特卡罗方法模拟升降法试验<sup>[10]</sup>, 取样本量  $n=50$ 、初始刺激量  $x_0=2 \text{ cm}$  和步长  $d=0.5 \text{ cm}$ , 以对数正态分布  $(\mu_1=0.80, \sigma_1=0.22)$  作为总体, 选用不同刺激量, 按升降法试验方案进行 3 组模拟试验, 模拟升降法试验数据见表 1。

通过把对数正态分布变换为正态分布, 综合利用表 1 中的三组升降法试验数据进行可靠性评估。取连接函数为  $\Phi(\beta_1 + \beta_2 x)$ , 利用二项分布广义线性模型可得参数  $\beta$  的极大似然估计  $(\hat{\beta}_1 = -3.81, \hat{\beta}_2 = 4.69)$ , 进

而可得分布参数的估计  $(\hat{\mu}=0.812, \hat{\sigma}=0.213)$ 。给定置信水平为  $\gamma=0.95$ , 已知工作刺激量水平  $x=6 \text{ cm}$ , 由式(8)可得该火工品的可靠性下限为  $0.9992$ 。由评估结果可知, 火工品在经过加速贮存试验后其可靠性依然满足要求, 因此其贮存寿命不小于  $15 \text{ a}$ 。

表 1 某火工品模拟升降法试验数据

Table 1 Up and Down test simulation data of an explosive initiator

stimulus /cm	A Group		B Group		C Group	
	response number	nonresponse number	response number	nonresponse number	response number	nonresponse number
1.5	0	7	0	5	0	5
2.0	7	12	5	14	5	15
2.5	12	5	14	5	14	5
3.0	5	1	5	1	4	1
3.5	1	0	1	0	1	0

### 6 结论

通过将加速寿命试验与升降法相结合, 有效地增加了火工品贮存寿命与可靠性信息量。同时利用广义线性模型对火工品贮存寿命进行评估, 可在较小样本量下, 显著地提高火工品贮存寿命评估的精确性与稳健性。以某飞行器火工品为例, 结合模拟升降法试验, 利用本文给出的方法进行加速贮存寿命试验与评估。结果表明, 该方法通过利用样本量约为  $150$ 、试验周期约为  $40 \text{ d}$  的加速贮存寿命试验和感度试验获得的数据, 可对贮存寿命要求为  $15 \text{ a}$  以上的飞行器火工品进行有效评估。

#### 参考文献:

- [1] 蔡瑞娇, 翟志强, 董海平, 等. 火工品可靠性评估试验信息熵等值方法[J]. 含能材料, 2007, 15(1): 79-82.  
CAI Rui-jiao, ZHAI Zhi-qiang, DONG Hai-ping, et al. Assessment method for reliability of initiating devices based on test information entropy equivalence [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(1): 79-82.
- [2] 赵婉, 杨静. 基于性能退化数据评价火工品贮存可靠性的方法[J]. 含能材料, 2012, 20(4): 406-408.  
ZHAO Wan, YANG Jing. Evaluation on storage reliability of pyrotechnics based on performance degradation data [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(4): 406-408.
- [3] 洪东跑, 赵宇. 基于时序模型的火工品贮存可靠性分析方法[J]. 兵工学报, 2009, 30(12): 1679-1683.  
HONG Dong-pao, ZHAO Yu. Storage reliability analysis of explosive initiator using time series model [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(12): 1679-1683.
- [4] HONG Dong-pao, ZHAO Yu. Sensitivity test and data analysis

- for storage reliability assessment of explosive initiator[J]. *Journal of China Ordnance*, 2010, 6(2): 119–125.
- [5] 赵婉, 韩天龙. 基于活化能的火工品加速贮存寿命试验优化设计方法[J]. 含能材料, 2009, 17(4): 475–477.  
ZHAO Wan, HAN Tian-long. Optimum design method of the accelerated storage life test for pyrotechnics based on activation energy[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009 17(4): 475–477.
- [6] AIAA S-113 Criteria for explosive systems and devices used on launch and space vehicles[S]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [7] 祝学军. 战术弹道导弹贮存延寿工程基础[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2015: 88–89.  
ZHU Xue-jun. Tactics Ballistic missile storage life extension engineering[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2015: 88–89.
- [8] Dixon W J, Mood H M. A method for obtaining and analyzing sensitivity data[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1948, 43(241): 109–126.
- [9] Chao M T, Fuh C D. Bootstrap method for the up and down test on pyrotechnology sensitivity analysis[J]. *Statistica Sinica*, 2001 (11): 1–21
- [10] 温玉全, 洪东跑. 基于 Bootstrap 方法的火工品可靠性评估[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 535–538.  
WEN Yu-quan, HONG Dong-pao. Reliability assessment for initiating devices based on Bootstrap[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 535–538.
- [11] Uusipaikka E. Confidence intervals in generalized regression models[M]. London: Chapman&Hall/CRC press, 2009: 176–178.
- [12] 洪东跑, 王英华, 管飞, 等. 基于广义线性模型的火工品可靠性数据分析[J]. 含能材料, 2015, 23(3): 270–274.  
HONG Dong-pao, WANG Ying-hua, GUAN Fei, et al. Reliability analysis for explosive initiator based on generalized linear models[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(3): 270–274.
- [13] Kalbfleisch John D, Prentice Ross L. The statistical analysis of failure time data[M]. Hoboken: John Wiley&Sons, 2002: 105–108.

## Accelerated Storage Life Test and Assessment Method for Explosive Initiator used on Aircraft

ZHAO Chang-jian<sup>1,2</sup>, HONG Dong-pao<sup>2</sup>, GUAN Fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Hai-rui<sup>1,2</sup>

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The explosive initiator used for aircraft is a product with high reliability and long life. In order to improve the storage life assessment precision of small sample size explosive initiator, through the analysis of the influence factors on storage life, an accelerated storage life model describing the relation of storage life and storage temperature for explosive initiator was established and a method suited for testing and evaluating the accelerated storage life of explosive initiator used for aircraft was proposed via a combination of sensitivity test and accelerated test. Based on the sensitivity test data of explosive initiator after acceleration and generalized linear model, the maximum likelihood estimations of the sensitivity distribution parameters were given. Then, the storage life assessment of explosive initiator used for aircraft was performed according to approximate normal characteristics of parameter estimations. The method was applied to one aircraft explosive initiator. The results show that the effective evaluation of explosive initiator required to store more than 15 years can be carried out via test data obtained by a sample size of about 150 and a period of about 40 days.

**Key words:** aircraft design; explosive initiator; accelerated storage life test; sensitivity test; generalized linear model

**CLC number:** TJ4; TB114.3

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.018