

专题——含能材料及其装置的老化、失效和寿命问题

# 火工品温湿度加速老化模型和算法研究

李芳, 张蕊, 张晶鑫, 麻宏亮, 袁晓霞, 张宸赫

(陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室, 西安 710061)

**摘要:** **目的** 研究对火工品适用的温湿度加速模型, 以及加速系数计算程序, 获取准确的温湿度加速系数外推公式。**方法** 通过分析国内外使用的各种双因素加速模型的适用性, 确定火工品适用的温湿度加速模型, 采用免费自由的开源统计分析软件——R软件, 对通过加速试验获取的某点火头2种温湿度加速条件下的试验数据, 进行单组数据拟合和多组数据拟合两种温湿度加速老化算法的开发, 并且对2种算法、3种寿命分布下寿命外推的准确性进行对比分析。**结果** 确定了Peck模型适合用于火工品的温湿度加速模型, 获取了某电点火头对应的温湿度加速系数和湿度项反应速率常数。**结论** 基于多组数据拟合的温湿度加速老化算法, 比基于单组数据拟合的温湿度加速老化算法对试验数据的兼容性好。3种寿命分布中, Weibull分布的加速系数计算结果最保守。

**关键词:** 加速模型; 数据处理; 温湿度双应力; 反应速率常数; 计算方法; 加速系数

中图分类号: TJ450

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)02-0001-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.02.001

## Research on Accelerated Aging Model and Algorithm of Temperature and Humidity of Initiators & Pyrotechnics

LI Fang, ZHANG Rui, ZHANG Jing-xin, MA Hong-liang, YUAN Xiao-xia, ZHANG Chen-he

(Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

**ABSTRACT:** In order to obtain the accurate extrapolation formula of temperature and humidity acceleration coefficient, the temperature and humidity acceleration model suitable for Initiators & Pyrotechnics and the calculation program of acceleration coefficient are studied. Through the analysis of the applicability of various two-factor acceleration models used at home and abroad, the temperature and humidity acceleration models applicable to the pyrotechnics are determined. The free and open-source statistical analysis software-R software is used to develop two temperature and humidity accelerated aging algorithms by a single set of data fitting and multiple sets of data fitting to test data obtained from an ignition head under two conditions of temperature and humidity acceleration by accelerated testing, and the accuracy of life extrapolation under three life distributions of the two algorithms is compared and analyzed. The Peck model is determined to be the temperature and humidity acceleration model applicable to Initiators & Pyrotechnics, and the temperature and humidity acceleration coefficients and the humidity term reaction rate constants corresponding to certain electric match is obtained. The temperature and humidity accel-

收稿日期: 2022-01-27; 修订日期: 2022-02-15

Received: 2022-01-27; Revised: 2022-02-15

作者简介: 李芳(1974—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为火工品安全性可靠性和寿命评估技术。

**Biography:** LI Fang (1974—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: safety, reliability and life evaluation technology of initiating explosive devices.

引文格式: 李芳, 张蕊, 张晶鑫, 等. 火工品温湿度加速老化模型和算法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 001-006.

LI Fang, ZHANG Rui, ZHANG Jing-xin, et al. Research on Accelerated Aging Model and Algorithm of Temperature and Humidity of Initiators & Pyrotechnics[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 001-006.

ated aging algorithm fitted to multiple sets of data is more compatible with the test data than the temperature and humidity accelerated aging algorithm based on a single set of data fitting; and among the three life distributions, the calculation results of the acceleration coefficient of the Weibull distribution are more conservative, and the life extrapolation results are more reliable.

**KEY WORDS:** accelerated model; data processing; temperature-humidity dual double stress; reaction rate constant; calculation method; accelerated factor

火工品的贮存寿命是指在一定的贮存环境条件下,满足产品性能和可靠性要求的贮存期限。通常系统对火工品的可靠贮存寿命要求为 10~20 a,通过自然贮存获得贮存寿命不现实,因此通常采用加速老化试验和加速失效试验的方法对贮存寿命进行考核和评估。加速寿命试验是指在超过使用环境条件的应力水平下对产品进行的寿命试验,通常包括步进应力、恒定应力和交替应力等加速试验方法<sup>[1-5]</sup>。在加速贮存条件下,由于火工品所处环境变得恶劣,从而使火工品加速失效,相比自然贮存,大幅度缩短了试验时间<sup>[6-9]</sup>。在所获得失效数据的基础上,运用加速老化模型,对火工品在正常应力水平下的性能特征进行统计推断<sup>[10]</sup>。国外对火工品系统和装置的寿命评估目前仍然是以温度单应力加速试验为主,文献中有温湿度加速寿命试验用于产品寿命外推的研究,但是在国外标准中未查到温湿度加速寿命试验用于产品寿命外推的规定,在标准中温湿度加速寿命试验多以暴露产品缺陷的强化试验或环境适应性试验为目的<sup>[11-16]</sup>。国内在火工品的寿命评估方面一直以来也是以基于温度单应力的国军标 71 °C 试验法为主<sup>[17]</sup>,针对贮存寿命评估方法的研究也多集中在失效模式和分析统计算法方面<sup>[18-23]</sup>。在温湿度双因素加速寿命试验方法标准方面,虽然有一项高温高湿试验法企业标准,但是由于所采用的艾琳模型中,温湿度项交互系数的确定缺少依据未被广泛使用<sup>[24]</sup>。近年来关于温湿度的加速老化试验方法研究的较少,目前尚没有形成可用的温湿度加速老化试验方法。

为了解决非密封火工品在自然贮存环境中较大湿度存在情况下的寿命外推时加速老化试验方法计算结果的准确性问题,本文拟通过研究温湿度加速老化试验方法的模型选择和模型参数的计算方法,利用不同温湿度应力下非密封火工品的温湿度加速寿命试验数据,采用倒推法进行模型参数计算,进而确定由高温高湿加速试验时间外推常温常湿贮存时间的温湿度加速模型外推公式,为火工品温湿度加速寿命试验方法的建立提供技术支撑。

## 1 温湿度双因素加速模型建立

在国外的现行标准中并未见到利用高温高湿加速试验时间外推常温常湿贮存时间的温湿度加速试验方法的相关条款,但是关于温湿度的加速模型文献中则多有报道。目前与活化能相关的比较成熟的温湿

度加速模型有劳森 (Lawson) 模型<sup>[15]</sup>、艾琳 (Aileen) 模型<sup>[24]</sup>、派克 (Peck) 模型<sup>[16]</sup>等。

劳森 (Lawson) 模型多用来对湿度所引起的腐蚀进行评估,其加速系数的计算公式为:

$$\tau = \frac{K_1}{K_2} = \frac{Ae^{-\frac{E_a}{k_B \times T_1}} e^{bH_1^2}}{Ae^{-\frac{E_a}{k_B \times T_2}} e^{bH_2^2}} = e^{\frac{E_a}{k_B} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} e^{b(H_1^2 - H_2^2)} \quad (1)$$

式中:  $T_1$  为试验环境温度, K;  $T_2$  为工作环境温度, K;  $H_1$  为试验环境的相对湿度;  $H_2$  为工作环境的相对湿度。

Q/AH 0180 《火工品加速寿命试验 高温高湿试验法》<sup>[24]</sup>中的温度-湿度加速模型采用的是广义艾琳 (Aileen) 模型,该模型的加速系数的表达式为:

$$\tau = \frac{T_0}{T_1} \exp \left[ B \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) + C(H_1 - H_0) + \frac{D}{R} \left( \frac{H_1}{T_1} - \frac{H_0}{T_0} \right) \right] \quad (2)$$

$$\tau = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \quad (3)$$

式中:  $\tau_1$  为温度项加速系数;  $\tau_2$  为湿度项加速系数;  $\tau_3$  为温湿度项交互的加速系数。

该模型的温度项加速系数  $\tau_1$  可通过温度加速寿命试验获取, Q/AH 0180 直接采用 71 °C 试验法公式中的参数:

$$\tau_1 = 2.7^{(T_1 - T_0)/10} \quad (4)$$

湿度项加速系数  $\tau_2$  则是通过 3 种非密封火工品在相同温度、不同湿度下的加速寿命试验数据统计计算后获取:

$$\tau_2 = r_2^{(H_1 - H_0)/0.05} \quad (5)$$

温湿度交互项加速系数  $\tau_3$  则无法通过加速试验获取。

派克 (Peck) 模型作为一种常用的温湿度加速模型,在多种材料的温湿度老化测试中被广泛选用。该模型是 Peck 为考察温湿度和塑封半导体装置寿命之间的相关性而建立的,其加速系数的计算公式为:

$$\tau = \left( \frac{H_A}{H_U} \right)^n \cdot e^{\frac{E_a}{k_B} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (6)$$

式中:  $n$  为湿度项反应速率常数,研究对象不同,其取值不同,取值范围通常为 1~5;  $E_a$  为试验对象的活化能;  $H_A$  为试验相对湿度;  $H_U$  为自然贮存相对湿度;  $k_B$  是玻尔兹曼常数,其值为  $8.617\ 385 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ;

文献[10]中将派克 (Peck) 模型进行变形后作为火工品密封失效的加速模型,并利用火工品常用药剂

的活化能对温度项反应速率常数  $r$  和湿度项反应速率常数  $n$  进行了推导, 得出了温度项反应速率常数介于 2.7~2.9, 湿度项反应速率常数保守取 1 的结论。其加速系数的外推计算公式为:

$$\tau = \left( \frac{H_1}{H_0} \right)^1 \cdot r^{\frac{T_1 - T_0}{10}}$$

(7)

对劳森 (Lawson) 模型、艾琳 (Aileen) 模型、派克 (Peck) 模型的分析比较可知, 艾琳模型虽然考虑了温度和湿度的相互影响, 但增加了模型参数获取的复杂度, 其温湿度项交互系数无法通过试验确定。劳森 (Lawson) 模型、派克 (Peck) 模型均是在假设温度和湿度所导致的失效机理相互独立的前提下建立的, 模型形式相似。其中, Peck 模型的温度项和湿度项分别采用的是相对湿度和 Arrhenius 公式, 文献[10]采用的是绝对湿度和 Arrhenius 公式的变形。

为探究相对湿度、绝对湿度谁更合适用于火工品的加速寿命评估, 本文从湿度的定义和对火工品考核的严酷度两方面进行分析。绝对湿度指每单位体积的空气中含有水蒸气的质量, 相对湿度指绝对湿度与该温度下饱和状态水蒸气含量之比, 用百分数表示, 其中饱和度是指在一定的气压和一定的温度条件下, 单位体积的空气中能够含有水蒸气的极限数值。同样地, 绝对湿度下, 环境温度越高, 单位体积中所能容纳的水蒸气的极限数值越大, 而相对湿度值越低。如绝对湿度为 47.5 g/m<sup>3</sup> 时, 30、60 °C 下的相对湿度分别为 98%、36%。也就是说, 对于同样的绝对湿度, 温度越高, 其相对湿度值越低。因此, 在进行火工品高温高湿加速寿命试验时, 相对湿度比绝对湿度的考核条件更为严苛。

目前进行高温高湿加速试验的模拟试验设备均是采用相对湿度进行试验条件的设定, 相对湿度与绝对湿度之间的转换也需要复杂的计算才能完成。因此, 本文结合 Peck 模型几种表示方式的优点, 建立了火工品温湿度加速系数研究的理论模型, 如式 (8) 所示。

$$\tau = \left( \frac{H_1}{H_0} \right)^n \cdot r^{\frac{T_1 - T_0}{A}}$$

(8)

式中:  $H_1$  为试验湿度;  $H_0$  为自然贮存湿度;  $T_1$  为试验温度;  $T_0$  为工作环境温度;  $r$  为温度项反应速率常数;  $A$  为温度增量。

## 2 双因素加速系数计算方法的实现

利用加速寿命试验数据计算加速系数和反应速率常数有 2 种算法: 一种是单组数据算法, 即首先利用每组温湿度应力下的试验数据分别计算出特征寿命、中位寿命、一定可靠度置信度下的寿命等寿命预测值, 然后利用 2 组或多组加速应力下的寿命预测值拟合得到加速系数, 最后利用 Peck 模型公式进行

反推湿度项的反应速率常数; 另一种是直接利用各不同加速应力下的多组试验数据, 采用 Peck 模型直接计算加速系数和反应速率常数。

为方便对两种算法进行比较, 表 1 给出了某电点火头 71 °C、95% 和 71 °C、85% 温湿度加速贮存后的加速寿命试验数据。其中, 该电点火头以瞎火作为失效依据。

表 1 某电点火头 71 °C、95% 和 71 °C、85% 温湿度加速贮存后的测试结果

Tab.1 Test result of a electric match after 71 °C, 95% and 71 °C, 85% acceleration

| Acceleration stress | Num | Test time/d | Sample number | Failure number |
|---------------------|-----|-------------|---------------|----------------|
| 71 °C, 95%          | 1   | 4           | 8             | 0              |
|                     | 2   | 7           | 7             | 1              |
|                     | 3   | 11          | 8             | 3              |
|                     | 4   | 14.5        | 8             | 3              |
|                     | 5   | 16          | 8             | 3              |
|                     | 6   | 18.5        | 32            | 28             |
| 71 °C, 85%          | 1   | 9           | 6             | 0              |
|                     | 2   | 14.5        | 6             | 0              |
|                     | 3   | 16.5        | 8             | 0              |
|                     | 4   | 19          | 8             | 0              |
|                     | 5   | 20          | 8             | 0              |
|                     | 6   | 21          | 8             | 2              |
|                     | 7   | 21.5        | 32            | 32             |

利用免费自由的开源统计分析软件——R 软件, 依据上述流程分别编制了 2 种算法的计算程序。为比较单组数据算法中试验数据对对数正态、Weibull 和指数 3 种分布的适应性, 分别对表 1 中某电点火头的 71 °C、95% 和 71 °C、85% 条件下的加速贮存试验数据进行计算。表 1 中 71 °C、95% 条件下正态、Weibull 和指数 3 种分布的寿命预测结果见表 2。

表 2 某电点火头 71 °C、95% 条件下 3 种分布的寿命预测结果

Tab.2 Life evaluation results of three distributing under 71 °C, 95% condition for a electric match

d

| Assumed distributing | Evaluation | Point evaluation | 60% lower confidence limit | 80% lower confidence limit |
|----------------------|------------|------------------|----------------------------|----------------------------|
| Lognormal            | Average    | 14.5             | 14.2                       | 13.5                       |
|                      | Median     | 13.2             | 12.9                       | 12.3                       |
|                      | R=0.9      | 7.6              | 7.3                        | 6.4                        |
|                      | R=0.99     | 4.9              | 4.5                        | 3.7                        |
| Weibull              | Average    | 14.1             | 13.9                       | 13.4                       |
|                      | Median     | 14.1             | 13.9                       | 13.3                       |
|                      | R=0.9      | 8.0              | 7.7                        | 6.9                        |
|                      | R=0.99     | 3.9              | 3.6                        | 3.0                        |
| Exponential          | Average    | 16.4             | 15.7                       | 14.1                       |
|                      | Median     | 11.4             | 10.9                       | 9.7                        |
|                      | R=0.9      | 1.7              | 1.6                        | 1.5                        |
|                      | R=0.99     | 0.16             | 0.16                       | 0.14                       |

从该电点火头 71 ℃、95%单组数据条件下 3 种分布的寿命估值结果来看, Lognormal 和 Weibull 分布的寿命估计结果比较接近, 而指数分布差距较大, 因此不建议以指数分布作为火工品寿命分布模型。从上述计算结果还可以看出, 平均寿命和中位寿命的估值比较接近, 火工品的预估寿命随着置信度和可靠度的增高而降低。

另一种算法是直接利用多组数据进行模型参数的计算, 其中加速模型采用 Peck 模型。为了与单组应力试验法进行对比, 产品的寿命模型也分别假设服从 Lognormal、Weibull 以及 Exponential 分布 3 种模型。该 3 种分布的寿命模型分别如式 (9)、式 (10) 和式 (11) 所示。

Weibull 分布模型:

$$T \sim \text{Weibull}(k, e^{\beta_0 + \beta_1 \lg(RH)}) \quad (9)$$

Lognormal 分布的寿命模型:

$$T \sim \text{lognormal}(e^{\beta_0 + \beta_1 \lg(RH)}, \sigma^2) \quad (10)$$

指数分布的寿命模型:

$$T \sim \exp(e^{-(\beta_0 + \beta_1 \lg(RH))}) \quad (11)$$

利用表 1 中某电点火头 71 ℃、95%和 71 ℃、85%条件下的加速数据, 计算该电点火头的湿度项反应速率常数的程序代码为:

```
Lno.Reli.RH(JA3, RH = 0.95, alpha = c(0.2, 0.4),
RHu = 0.85)
$MTTF
[1] 14.43259
$`Point Estimator`
[1] 0.05759085
$`Lower Confidence Bound`
[1] 0.03500031 0.04963651
$`Accelerated Factor`
[1] 1.852382
```

为便于比较单组数据计算法和多组数据计算法的优劣性, 分别利用表 1 中火工品不同温湿度应力下的试验数据对模型参数进行了计算。

Lognormal 分布下模型参数估计结果:

$$\hat{\beta}_0 = 2.462\ 029\ 3, \hat{\beta}_1 = -3.294\ 286\ 9, \hat{\sigma}^2 = 0.277\ 434\ 3$$

Weibull 分布下模型参数估计结果:

$$\hat{k} = 6.131\ 796\ 9, \hat{\beta}_0 = 2.674\ 702, \hat{\beta}_1 = -2.294\ 222\ 3$$

Exponential 分布的参数估计结果:

$$\hat{\beta}_0 = 2.513\ 462\ 7, \hat{\beta}_1 = -5.542\ 536\ 8$$

### 3 加速系数和反应速率常数的计算

利用编制的计算程序对表 1 中的试验数据分布进行了火工品加速系数  $\tau$  和湿度项反应速率常数  $n$  的计算。单组数据计算法先由各不同加速应力下的试验数据计算加速系数, 由加速系数反推反应速率常数; 多组数据计算法中, 由于模型参数  $\beta_1$  的值代表反应速率常数, 因此它是由反应速率常数计算加速系数的

值。单组数据计算法和多组数据计算法的计算模型如式 (12) 所示。由于两组试验的温度应力均为 71 ℃, 因此公式中温度项系数为 1。

$$\tau = \left( \frac{H_1}{H_0} \right)^n \cdot r^{\frac{T_1 - T_0}{A}} = \left( \frac{H_1}{H_0} \right)^{-\beta_1} \quad (12)$$

由单组数据计算法和多组数据计算法计算得到的加速系数和反应速率常数见表 3。

表 3 某电点火头湿度项加速系数计算结果

Tab.3 Calculation result of humidity acceleration coefficient of a electric match

|             | Single group data calculation |          | Multi-groups data calculation |          |
|-------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
|             | $\tau$                        | $n$      | $\tau$                        | $n$      |
| Lognormal   | —                             | —        | 1.44                          | 3.294 24 |
| Weibull     | —                             | —        | 1.56                          | 2.294 17 |
| Exponential | 1.852 37                      | 5.542 35 | 1.85                          | 5.542 40 |

从表 3 的计算结果可以看出, 对于同样 2 两组数据, 在 Lognormal 和 Weibull 分布的计算中, 单组数据计算法的加速系数和反应速率常数的计算结果为负值, 进而导致了无效数据的出现。这说明多组数据计算法对试验数据的兼容性优于单组数据计算法, 能有效降低单组数据计算法由于失效数据分布不均匀引起的加速系数计算的错误几率。

在加速寿命试验中, 根据加速试验结果外推火工品寿命时, 所采用加速模型中的加速系数越小、越保守, 寿命外推结果越可靠, 但过分保守的加速系数会影响采用加速试验进行寿命外推的效率, 造成对火工品实际贮存寿命的低预估。因此, 确定合适的加速系数对火工品寿命外推结果的可靠性和准确性非常重要。从表 3 的计算结果可以看出, 在多组数据计算法中, Weibull 分布计算的某电点火头的加速系数和反应速率常数最小, 也最保守, Lognormal 次之, Exponential 分布估计的结果最大。因此, 在没有自然贮存寿命数据进行验证的情况下, 首选 Weibull 分布为火工品寿命分布的最优分布。

### 4 结论

通过以上研究, 可以得出以下结论:

1) 温湿度模型中, 湿度项的基数取相对湿度对火工品考核的更严苛, 评估结果的可靠性更高。

2) 加速系数多组数据拟合法对加速试验数据的兼容性更好, 能有效降低单组数据法由于失效数据分布不均匀引起的加速系数计算的错误几率。

3) 在由多组不同应力下的加速试验数据计算加速系数和反应速率常数时, Weibull 分布估计的结果最为保守, 为保证寿命评估结果的可靠性, 在双因素加速模型选择时, 建议首选 Weibull 分布。

## 参考文献:

- [1] 赵伟, 王成. 火工品失效模式[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(7): 14-16.  
ZHAO Wei, WANG Cheng. Failure Mode of Pyrotechnics [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010, 31(7): 14-16.
- [2] 孙训俊. 电器产品贮存寿命分析方法的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.  
SUN Xun-jun. Research on Electrical Products Storage Life Analytical Method[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [3] 张志华. 加速寿命试验及其统计分析[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2002.  
ZHANG Zhi-hua. Acceleration Life Test and Its Statistical Analyse[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2002.
- [4] 张春华, 陈循, 温熙森. 步降应力加速寿命试验(上篇)——方法篇[J]. 兵工学报, 2005, 26(5): 661-665.  
ZHANG Chun-hua, CHEN Xun, WEN Xi-sen. Step-Down-Stress Accelerated Life Testing—Methodology[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(5): 661-665.
- [5] 张春华, 陈循, 温熙森. 步降应力加速寿命试验(下篇)——统计分析篇[J]. 兵工学报, 2005, 26(5): 666-669.  
ZHANG Chun-hua, CHEN Xun, WEN Xi-sen. Step-down-Stress Accelerated Life Testing—Statistical Analysis[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(5): 666-669.
- [6] 陈挚. 用步进应力加速寿命试验法分析爆炸螺栓的可靠性[J]. 数学理论与应用, 2001, 21(2): 106-110.  
CHEN Zhi. A Reliability Analysis of Explosive Bolt Using a Method about Stepping up Stress Accelerative Life Testing[J]. Mathematical Theory and Application, 2001, 21(2): 106-110.
- [7] 张蕊, 李芳, 都振华, 等. 电火工品单一温度下的贮存特性研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(S1): 329-333.  
ZHANG Rui, LI Fang, DU Zhen-hua, et al. Research on Storage Characteristics of Electric Explosive Devices under Single Temperature Storage Condition[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 329-333.
- [8] 张福光, 崔旭涛, 洪亮. 导弹火工品贮存寿命的影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 24-27, 30.  
ZHANG Fu-guang, CUI Xu-tao, HONG Liang. Influencing Factor Analysis of Storage Life of Missile Initiating Explosive Devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 24-27, 30.
- [9] 郑波, 杨宝强, 南彬, 等. 步进应力加速寿命试验在预测底火贮存寿命中的应用[J]. 火工品, 2003(1): 19-21.  
ZHENG Bo, YANG Bao-qiang, NAN Bin, et al. Application of Stepping Stress Acceleration Life Test in Forecasting Primer Storage Life[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2003(1): 19-21.
- [10] 袁志发, 周静芋. 多元统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
YUAN Zhi-fa, ZHOU Jing-yu. Multivariate Statistical Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [11] YANG L C. Correlation between the Accelerated Aging Test (AAT) and Real World Storage Temperature, La Canada Flintridge[C]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Cincinnati: [s. n.], 2007.
- [12] MIL-STD-1576, Electroexplosive Subsystem Safety Requirements and Test Methods for Space Systems[S].
- [13] YANG L C, DAO M T. Service Life Extension of Minuteman II Thrust Termination Ordnance to Forty-Five Years[C]//39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. [s. l.]: AIAA, 2003.
- [14] YANG Li-en, MILLER D, RILEY J, et al. Testing of Mini-Igniter Containing 35-Year-Old B/KNO<sub>3</sub> Pellets[C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Virginia: AIAA, 2006: 4811.
- [15] YANG Li-en, MILLER D, KUENNEN T. Advanced Applications of Statistical Methods in Testing of Energetic Components and Systems[C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Virginia: AIAA, 2005.
- [16] PECK D S. Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation[C]//24th International Reliability Physics Symposium. Anaheim: IEEE, 1986.
- [17] GJB 736.8—90, 火工品试验方法 71 °C 试验法[S].  
GJB736.8—90, Initiating Explosive Device Method of the Test at 71 °C[S].
- [18] 王耀冬, 俞卫博, 宣兆龙, 等. 基于储存应力折算的火工品恒加试验数据处理方法[J]. 火工品, 2016(2): 33-36.  
WANG Yao-dong, YU Wei-bo, XUAN Zhao-long, et al. Data Processing Method Based on Equivalent Storage Stress for Constant Stress Accelerated Life Test of Initiating Explosive Device[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(2): 33-36.
- [19] 麻宏亮, 张蕊, 李芳, 等. 趋势分析方法在火工品寿命评估中的应用[J]. 火工品, 2013(3): 53-56.  
MA Hong-liang, ZHANG Rui, LI Fang, et al. The Application of Trend-Line Analysis in Life Prediction of Initiating Explosive Device[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(3): 53-56.
- [20] 谭源源, 张春华, 陈循, 等. 基于加速寿命试验的剩余寿命评估方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 150-154.  
TAN Yuan-yuan, ZHANG Chun-hua, CHEN Xun, et al. Remaining Life Evaluation Based on Accelerated Life Testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 150-154.

- [21] 茆诗松, 韩青. Weibull 分布定时截尾样本下寿命试验与加速寿命试验的统计分布[J]. 应用概率统计, 1991, 7(1): 61-72.  
MAO Shi-song, HAN Qing. Statistical Analysis of Life and Accelerated Life Test on Weibull Distribution Case under Type 1 Censoring[J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 1991, 7(1): 61-72.
- [22] 刘朝阳, 赵晓利, 杨岩峰, 等. 制导弹药火工品单应力水平加速寿命试验研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(5): 29-31.  
LIU Chao-yang, ZHAO Xiao-li, YANG Yan-feng, et al. Study on Single Stress Level Accelerated Life Test of Guided Ammunition Initiating Device[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5): 29-31.
- [23] 赵然. 有已知寿命相似产品陪试的加速寿命试验方法[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2009.  
ZHAO Ran, Accelerated Life Test Method with Known Life Similar Products[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2009.
- [24] Q/AH 0180—98, 火工品加速寿命试验 高温高湿试验法[S].  
Q/AH 0180—93, Accelerated Life Test of Initiating Explosive Device—Method of High Temperature and High Humidity Test[S].