

火工品温湿度双应力加速寿命试验方法研究

李芳, 麻宏亮, 都振华, 袁晓霞, 张蕊, 李军

(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** 获取火工品温湿度加速系数, 建立温湿度双因素加速寿命试验方法。**方法** 通过设计 3 种火工品不同温湿度加速条件下的加速寿命试验, 定期取样进行性能测试, 利用获取的性能数据和选定的温湿度加速模型, 计算 3 种火工品的温湿度加速系数和湿度项反应速率常数, 确定温湿度加速模型公式。**结果** 获取了 3 种火工品的温湿度加速系数和湿度项模型参数, 初步建立了火工品温湿度双因素加速寿命试验方法, 并对下一步研究方向进行了展望。**结论** 建立的火工品温湿度双因素加速寿命试验方法可由高温高湿加速试验时间外推常温常湿贮存时间, 适用于自身密封性差或密封失效, 且贮存环境湿度大的火工品的寿命预测。

关键词: 火工品; 温湿度双因素; 加速寿命试验; 温湿度加速模型; 加速系数; 寿命预测

中图分类号: TJ450

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)12-0054-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.12.009

Temperature and Humidity Dual Stress Accelerated Life Test Method of Pyrotechnics

LI Fang, MA Hong-liang, DU Zhen-hua, YUAN Xiao-xia, ZHANG Rui, LI Jun

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

ABSTRACT: The work aims to establish a temperature and humidity two-factor accelerated life test method to obtain the temperature and humidity acceleration coefficient of pyrotechnics. By designing the accelerated life test of three kinds of pyrotechnics under different temperature and humidity acceleration conditions, regular sampling for performance test, the temperature and humidity acceleration coefficient and humidity term reaction rate constant of the three fire products are calculated based on the obtained performance data and selected temperature and humidity acceleration model, and the formula of the temperature and humidity acceleration model was determined. The temperature and humidity acceleration coefficient and humidity term model parameters of three kinds of pyrotechnics were obtained, and the temperature and humidity two-factor accelerated life test method of pyrotechnics was preliminarily established, and the next research direction was prospected. The established two-factor accelerated life test method of temperature and humidity of pyrotechnics can be extrapolated from the high-temperature and high-humidity accelerated test time to the storage time of normal temperature and humidity, which is suitable for the life prediction of pyrotechnics with poor sealing or sealing failure and high storage environment humidity.

KEY WORDS: pyrotechnics; temperature and humidity double factor; accelerated life test; temperature and humidity acceleration model; acceleration factor; life prediction

收稿日期: 2022-11-24; 修订日期: 2022-12-02

Received: 2022-11-24; Revised: 2022-12-02

作者简介: 李芳 (1974—), 女, 硕士, 研究员, 主要研究方向为火工品安全性可靠性技术。

Biography: LI Fang (1974-), Female, Master, Researcher, Research focus: safety reliability technology of initiating explosive devices.

引文格式: 李芳, 麻宏亮, 都振华, 等. 火工品温湿度双应力加速寿命试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 054-059.

LI Fang, MA Hong-liang, DU Zhen-hua, et al. Temperature and Humidity Dual Stress Accelerated Life Test Method of Pyrotechnics[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 054-059.

随着国际形势的日益复杂和我国国防安全的需要, 实战化演习、训练和战备值班的任务越来越多。武器弹药尤其是新型高价值弹药在贮存、服役过程及参与勤务任务中, 受多种环境影响后, 其贮存寿命成为影响武器弹药作战使命完成的关键^[1-4]。火工品属于一次性作用产品, 具有长期贮存、一次使用的特点, 因此贮存是火工品全寿命周期的一个重要阶段。

火工品的贮存寿命, 是指产品在规定的贮存条件下和规定的贮存时间内, 维持产品规定功能的能力^[5]。武器系统对火工品的可靠贮存寿命要求一般为 10~20 a, 因此对火工品贮存寿命的考核通常采用加速试验的方法进行, 多采用 71 °C 试验法。火工品在加工和贮存过程中, 不可避免地会受到不同程度湿度的影响。火工品在不同库房贮存条件下的自然贮存结果表明, 在恒温恒湿库房条件下, 产品的寿命高出无空调库房下的寿命近 1 倍。关于我国库房贮存产品故障率南高北低差异原因的调研结果也表明, 湿度在火工品的贮存失效中扮演着重要的角色^[6-7]。因此, 71 °C 试验法对在贮存过程中采取了防止水分侵蚀措施或本身密封性较好的火工品比较适用, 对于贮存环境湿度较大且本身非密封的火工品, 采用 71 °C 试验法进行评估则容易出现问題。目前, 关于温度的加速寿命试验方法和统计计算方法方面的研究较多, 方法也较为成熟^[8-22], 但关于温湿度加速寿命试验方法的研究多集中在加速模型和计算方法方面, 现有的定时截尾温湿度加速寿命试验方法, 并未得到广泛的应用^[23-25]。因此, 本文通过设计不同种类火工品的温湿度加速寿命试验, 获取其加速系数, 进而建立适用于火工品的温湿度加速寿命试验方法, 为贮存环境湿度大且本身非密封火工品的寿命评估提供手段。

1 温湿度加速系数和模型参数计算过程的理论推导

一个合适的加速模型通常是以大量的试验数据为基础, 基于某一理论而建立起来的, 但由于火工品为一次性作用产品, 其装药的特殊性无法通过定量反复测试获取性能参数, 因此通过试验建立火工品的试验模型比较困难。本文通过对国内外文献中诸多双因素模型的分析研究, 选定 PECK 模型作为温湿度加速模型^[23-25]。PECK 模型是 PECK 在 1970 年为考察温湿度与塑封半导体装置寿命之间的相关性而通过大量试验建立的模型, 后又以环氧封装管为研究对象, 使用 61 个数据点对高温高湿加速条件下环氧封装管的失效率参数重新进行了研究, 给出了以 85 °C/85%RH 为基准的不同温湿度取值时环氧封装管的加速系数^[23]。该模型研究对象环氧封装管密封失效的原理与盖片涂胶密封或绸垫刷漆边缘涂胶密封的火工

品的失效过程类似, 但由于两者结构、材料不同, 公式中的模型参数肯定不同。因此, 本文以 PECK 模型为温湿度加速模型, 利用不同温湿度应力下的加速试验数据, 对加速系数和模型参数进行推导。

其加速系数基本表达式为:

$$\tau = \left(\frac{RH_1}{RH_0} \right)^n \cdot e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1)$$

式中: n 为湿度项反应速率常数, 不同研究对象 n 的取值不同, 取值范围通常为 1~5; E_a 为试验对象的活化能; RH_1 为试验相对湿度; RH_0 为自然贮存相对湿度; K_B 是玻尔兹曼常数, 其值为 $8.617\ 385 \times 10^{-5}$ eV/K; T_1 是试验环境的热力学温度; T_0 是自然贮存的热力学温度。

式(1)中, 当加速寿命试验取相同的试验应力, 即 T_1 、 T_0 相等, 温湿度加速系数 τ 则变为试验温度 T_1 下湿度 RH_1 对 RH_0 的加速系数 τ_{RH} , 从而可利用 PECK 模型公式, 反推求得湿度项模型参数 n 。

对式(1)中 Arrhenius 模型形式的温度项和国军标 71 °C 试验法公式中变形后温度项形式之间的关联性的研究表明, 71 °C 试验法公式中, r 取 2.7 时, 对应理论上的药剂活化能远远低于火工品实际使用的含能材料本身的活化能, 包括火工药剂中活化能最小的四氮烯。因此, 71 °C 试验法标准中 r 取 2.7 相对保守, 对火工品具有普适性, 该方法的加速系数的确定方法见文献《火工品工程设计与试验》^[25-26]。

因此, 结合国军标 71 °C 试验法, 最终形成的温湿度加速系数计算公式为:

$$\tau = \left(\frac{RH_1}{RH_0} \right)^n \cdot r^{\frac{T_1 - T_0}{A}} \quad (2)$$

式中: r 取 2.7, A 取 10。

2 火工品温湿度加速系数用试验数据的获取

由温湿度加速系数计算过程的理论推导可知, 为获取模型参数, 首先需要通过不同种类非密封火工品的加速试验获取失效数据, 计算出相应火工品的温湿度加速系数后, 利用加速模型才可反推出模型参数。因此, 本文首先进行了温湿度加速试验的设计。

2.1 试验样品选择和温湿度加速试验

为提高试验效率, 首先根据温湿度加速寿命的特点进行了试验对象的选取, 选取的火工品以自身非密封的火工品为主。这类火工品在自然贮存环境中非密封包装情况下, 较易受到湿度的影响而失效, 包括电火工品和非电火工品。选用的火工品的结构及失效判据见表 1。试验应力的选取以高温高湿应力为主, 以

表1 加速寿命试验用火工品封装结构及失效判据

Tab.1 Packaging structure and failure judgement basis of pyrotechnics for accelerated life test

序号	名称	结构	失效判据
1	电点火头	电极塞处胶密封	作用时间 ≥ 50 ms 或未发火
2	针刺火帽	盖片涂胶密封	未发火或击针未击穿
3	火焰雷管	绸垫刷漆涂胶密封	炸孔直径小于雷管直径或铅板未炸穿或不发火

71 °C、95%RH 和 71 °C、85%RH 条件开展上述 3 种火工品的温湿度加速试验，并间隔取样进行性能测试，直到出现失效。

2.2 温湿度加速寿命试验结果分析

表 2—7 给出了 3 种火工品在 71 °C、95%RH 和 71 °C、85%RH 条件下的加速寿命试验结果。

表 2 某电点火头 71 °C、95%RH 加速后的测试结果

Tab.2 Test result of an electric ignition head after acceleration at 71 °C, 95%RH

序号	贮存时间/d	取样数量	失效数量
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

表 3 某电点火头 71 °C、85%RH 加速后的测试结果

Tab.3 Test result of an electric ignition head after acceleration at 71 °C, 85%RH

序号	贮存时间/d	取样数量	失效数量
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

表 4 某针刺火帽 71 °C、95%RH 加速后的测试结果

Tab.4 Test result of a primer after acceleration at 71 °C, 95%RH

序号	贮存时间/d	取样数量	失效数量
1	15	8	0
2	30	6	0
3	45	8	2
4	60	8	3
5	75	8	3
6	82	8	1
7	86	8	4

表 5 某针刺火帽 71 °C、85%RH 加速后的测试结果

Tab.5 Test result of a primer after acceleration at 71 °C, 85%RH

序号	贮存时间/d	取样数量	失效数量
1	30.5	8	0
2	47.5	8	0
3	63.5	8	0
4	79	8	0
6	93	8	0
7	107	8	0
8	121	8	0
9	135	8	0
0	140	8	0
10	154	8	1
11	161	8	2
12	167	8	5

表 6 某火焰雷管 71 °C、95%RH 加速后的测试结果

Tab.6 Test result of a flame detonator after acceleration at 71 °C, 95%RH

序号	贮存时间/d	取样数量	失效数量
1	28	5	0
2	56	5	0
3	84	5	0
4	99	6	2
5	114	6	3
6	129	6	2
7	144	8	3
8	159	6	3

表 7 某火焰雷管 71 °C、85%RH 加速后的测试结果

Tab.7 Test result of a flame detonator after acceleration at 71 °C, 85%RH

序号	贮存时间/d	取样数量	失效数量
1	30.5	8	0
2	60.5	8	0
3	90	8	0
4	120	8	0
5	150	8	2
6	196	8	5

3 温湿度加速系数的计算

利用表 2—7 获取的试验数据进行温湿度加速系

数的计算, 有 2 种算法: 一种是单组数据计算法, 即单独利用每种加速应力下的试验数据, 分别计算出特征寿命, 再利用任意 2 组加速应力下的特征寿命比值, 计算出加速系数, 最后利用 PECK 模型公式反推湿度项的反应速率常数; 另一种方法是利用不同加速应力下的多组试验数据, 采用 PECK 模型直接计算反

应速率常数。

研究发现, 单组数据计算法对试验数据的一致性要求很高, 通过单组数据计算法计算的加速系数并不理想^[26], 而采用 PECK 模型直接计算则获得了较好的计算结果。3 种试验火工品的加速系数 τ_{RH} 和湿度项反应速率常数 n 的计算结果见表 8。

表 8 加速系数和湿度项反应速率常数的计算结果

Tab.8 Calculation results of acceleration coefficient and reaction rate constant of humidity term

分布类型	某电点火头		某针刺火帽		某火焰雷管	
	τ_{RH}	n	τ_{RH}	n	τ_{RH}	n
Exponential 分布	1.852	5.542	2.722	9.006	1.695	4.748
Weibull 分布	1.290	2.294	1.485	3.555	1.290	2.294
Lognormal 分布	1.442	3.294	1.622	4.349	1.345	2.665

从表 8 中的计算结果可以看出, Weibull 分布估计的结果最为保守, lognormal 其次, 指数分布估计的结果最激进, 这也验证了在与时间有关的失效率分布模型中, 首选 Weibull 分布的经验结论。为提高寿命估计结果的可靠性, 最终以 3 种火工品 Weibull 分布下的计算结果为准, 见表 9。

表 9 加速模型中加速系数的选用结果

Tab.9 Acceleration coefficient selection result of acceleration model

样品名称	试验条件		τ_{RH}	n
	温度/℃	相对湿度%		
某电点火头	71	95, 85	1.29	2.29
某针刺火帽	71	95, 85	1.49	3.56
某火焰雷管	71	95, 85	1.29	2.29

综合 3 种试验火工品的加速系数和反应速率常数的估值, 保守取 2 作为温湿度加速寿命试验方法中 n_{RH} 的估值, 则可以确定温湿度加速寿命试验方法的加速系数计算公式为:

$$\tau = \left(\frac{RH_1}{RH_0} \right)^2 \cdot r^{\frac{T_1 - T_0}{10}} \quad (3)$$

其中, 参照 GJB 736.8—1990《火工品试验方法 71℃ 试验法》, r 取值为 2.7。

4 温湿度双应力加速寿命试验方法的建立

4.1 方法操作流程

火工品温湿度加速系数计算公式确定后, 则可以建立温湿度加速寿命试验方法的操作流程, 从而达到利用该试验方法进行由高温高湿下的试验时间外推常温常湿下贮存时间的目的。建立的火工品温湿度加速寿命试验方法主要适用于自身密封性差或未进行

密封包装的火工品, 已知温度项和湿度项加速系数的条件下, 由火工品高温高湿下的试验时间外推其常温常湿下的贮存时间。

试验方法的操作流程如下:

1) 在规定的试验条件范围 (温度为 50~71℃、相对湿度为 65%~95%) 内, 根据火工品的材料、装药和技术要求, 选择一组试验条件, 并按式 (4) 计算出加速系数。

$$\tau = \left(\frac{RH_1}{RH_0} \right)^2 \cdot 2.7^{\frac{T_1 - T_0}{10}} \quad (4)$$

2) 一次随机抽取所需要的试样, 样本量根据测试项目及火工品技术条件的要求确定, 将抽取的试样装入防爆器内。

3) 确定测试项目和取样时间。测试项目应选取最能反映试样性能变化且敏感的项目 (参照 GJB 736.8—1990), 一般是 1~2 项, 每个测试项目可选择的样本量为 15~30 发。测试项目和测试样本量的选取也可由使用方和生产方协商确定。取样时间根据用户需求进行计算得到。

4) 将装有试样的防爆器放入设定试验条件的试验箱内, 并立即关闭箱门, 记录放样时间。按规定试验间隔及时取样, 将取出的试样在常温常湿条件下恢复至少 24 h 后, 进行性能测试。

5) 根据性能测试结果, 以火工品的技术条件为依据, 判断试样是否合格。若进行的试验项目技术条件无规定, 应按照 GJB 736.8—1990《火工品试验方法 71℃ 试验法》中规定的 t 检验法, 作出是否发生显著性变化的结论。若经本方法试验, 测试结果全部合格 (或经检验无显著性变化), 按照式 (5) 计算并给出常温常湿下贮存时间的估计。

$$t_0 = \tau \cdot t \quad (5)$$

4.2 应用示例

以某电雷管为例, 预测该电雷管在常温常湿

(21℃、60%RH)环境下能否达到10a的贮存寿命,选取该电雷管30发,以71℃、95%RH为温湿度加速试验条件。通过式(4)计算其加速系数为359,则需在71℃、95%RH条件下进行的试验时间为:

$$t_{\text{试验}} = \frac{t_{\text{贮存}}}{\tau} \approx 10 \text{ d} \quad (6)$$

按照前述流程进行71℃、95%RH下的试验10d。试验完成后,按照验收试验要求进行相关环境试验后进行性能试验,根据性能试验的结果即可考察该电雷管在常温常湿下能否达到10a的贮存时间。

5 结语

本文以PECK模型为温湿度加速模型,利用3种火工品不同温湿度下的加速寿命试验数据,确定了PECK模型中的模型参数,建立了温湿度双应力加速寿命试验方法。该方法可与71℃试验法一起作为火工品寿命评估程序中一种备选的加速寿命试验方法,其中71℃试验法应用于贮存过程中自身密封性好或密封包装状态、单独贮存的火工品的贮存寿命预测;温湿度双因素加速寿命试验方法应用于自身密封性差或密封失效,且贮存环境湿度大的火工品。

目前,对胶密封或绸垫密封的火工品的密封失效时间尚不具备定量的考核手段,而对火工品密封失效时间的正确判断是火工品温湿度双因素加速寿命试验方法外推结果准确与否的关键,胶密封或绸垫密封火工品的密封失效检测是下一步研究的一项内容。同时,进行火工品寿命评估或延寿时,加速寿命试验是选用71℃试验法还是温湿度双因素加速寿命试验法,应结合火工品的贮存环境剖面来决定。如何获取准确的贮存环境剖面,并依据贮存环境剖面制定相应的实验室等效模拟评估流程,是火工品寿命评估亟待解决的一个问题。

参考文献:

- [1] 张仕念, 吴勋, 颜诗源, 等. 贮存使用环境对导弹性能的影响机理[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 17-22.
ZHANG Shi-nian, WU Xun, YAN Shi-yuan, et al. Influencing Mechanism of Storage/Use Environment on Missile Performance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 17-22.
- [2] 王鹏, 胡昌华, 侯立安, 等. 考虑测试影响的武器装备贮存寿命预测[J]. 电光与控制, 2015, 22(2): 94-99.
WANG Peng, HU Chang-hua, HOU Lian, et al. Storage Life Prediction of Weapons and Military Equipment Considering the Impact of Measurement[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(2): 94-99.
- [3] 齐伟. 弹上火工品报废处理技术研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(11): 132-136.

- QI Wei. Scrap Disposal Technology for Initiating Explosive Devices of Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(11): 132-136.
- [4] BAGHESTAN K, REZAEI S M, TALEBI H A, et al. An Energy-Saving Nonlinear Position Control Strategy for Electro-Hydraulic Servo Systems[J]. ISA Transactions, 2015, 59: 268-279.
- [5] 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.
- [6] 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.
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.
- [7] GJB 736.8—1990, 火工品试验方法 71℃试验法[S].
GJB 736.8—1990, Initiating Explosive Device Method of the Test at 71℃[S].
- [8] 李芳, 张蕊, 都振华, 等. 不同贮存环境下SCB电极塞的失效机理[J]. 含能材料, 2015, 23(2): 168-172.
LI Fang, ZHANG Rui, DU Zhen-hua, et al. Failure Mechanism of SCB Electrode Plugs under Different Storage Conditions[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(2): 168-172.
- [9] 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.
- [10] YANG L C. Correlation between the Accelerated Aging Test (AAT) and Real World Storage Temperature[J]. Collection of Technical Papers, 2007, 2: 1407-1418.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 菲诗松, 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 陈攀. 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.
- [21] 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.
- [22] PECK D S. Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation[C]//24th International Reliability Physics Symposium. Anaheim: IEEE, 1986.
- [23] Q/AH 0180—98, 火工品加速寿命试验 高温高湿试验法[S].
Q/AH 0180—98. Accelerated Life Test of Initiating Explosive Device—Method of High Temperature and High Humidity Test[S].
- [24] 王凯民, 张学舜. 火工品工程设计与试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 271-284.
WANG Kai-min, ZHANG Xue-shun. Engineering design and test technology of initiators & pyrotechnics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 271-284.
- [25] 李芳, 张蕊, 付东晓, 等. 71℃试验法公式与 Arrhenius 公式的相关性研究[J]. 火工品, 2020(3): 57-60.
LI Fang, ZHANG Rui, FU Dong-xiao, et al. Correlation Study of 71℃ Method Formula and Arrhenius Formula[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020(3): 57-60.
- [26] 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): 1-6.
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): 1-6.

责任编辑: 刘世忠