

71 °C 试验法寿命外推结果的影响因素分析

李芳, 张鹏辉, 王红刚, 谢明伟, 彭钺, 胡伟

(陕西应用物理化学研究所 瞬态化学效应与控制全国重点实验室, 西安 710061)

摘要: **目的** 研究 71 °C 试验法用于火工品贮存寿命外推结果的准确性。**方法** 采用对比分析的方法, 对美军标和国军标中 71 °C 试验法的寿命影响因素进行分析。**结果** 加速模型、试验条件和外推温度取值对火工品的寿命外推结果均有影响。**结论** 71 °C 试验法评估结果的准确性取决于使用场景是否正确, 试验条件设置是否合理, 贮存环境温度取值是否准确, 并提出了 71 °C 试验法的使用建议。

关键词: 火工品; 71 °C 试验法; 贮存寿命; 加速模型; 寿命外推

中图分类号: TJ450.89

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)04-0035-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.04.005

Analysis of Influencing Factors on Life Extrapolation Results of 71 °C Test Method

LI Fang, ZHANG Penghui, WANG Honggang, XIE Mingwei, PENG Yue, HU Wei

(State Key Laboratory of Transient Chemical Effects and Control, Shaanxi Applied Physics-chemistry
Research Institute, Xi'an 710061, China)

ABSTRACT: The work aims to study the accuracy of the 71 °C test method for extrapolating the storage life of pyrotechnics. By using a comparative analysis method, the life influencing factors of the 71 °C test method in the US military standard and the national military standard were analyzed. The acceleration model, experimental conditions, and extrapolated temperature values all had an impact on the life extrapolation results of pyrotechnics. In conclusion, the accuracy of the evaluation results using the 71 °C test method depends on whether the usage scenario is correct, whether the test conditions are set reasonably, and whether the storage environment temperature value is accurate. Suggestions for the use of the 71 °C test method are proposed.

KEY WORDS: pyrotechnics; 71 °C test method; storage life; acceleration model; life extrapolation

火工品承担着点火、起爆和分离做功等重要作用, 具有首发性和敏感性和作用一次性等特点^[1]。如何在当今日益复杂而恶劣的环境下, 客观准确地评价火工品的服役寿命, 成为一个热点问题^[2-6]。当火工品处于贮存状态, 且密封性较好的情况下, 火工品贮存性能的变化可以认为主要受贮存温度的影响, 因此火工品的寿命主要指贮存寿命^[7-10]。71 °C 试验法是基于 Arrhenius 模型, 能反映温度对火工品性能变化的影响规律, 因此该方法是目前用于火工品贮存寿命评

估的主要有效方法^[11]。该方法在 1971 年开始用于航空含能材料和系统 (ECS) 的贮存寿命验证。在 1971 年“第 7 届炸药烟火药会议文集”中, 由 Sidney 所著的《宇航爆炸元件加速寿命试验》一文中详细介绍了加速寿命试验的试验方法, 该文批评了过去以起爆元件内药剂的安定性来判断起爆元件真实寿命的片面性, 提出必须进行整个元件的加速寿命试验, 将元件在通过加速寿命试验后输出的威力能量值和以前的数据进行比较, 最终外推出起爆元件的可靠寿命。

收稿日期: 2024-03-01; 修订日期: 2024-04-06

Received: 2024-03-01; Revised: 2024-04-06

引文格式: 李芳, 张鹏辉, 王红刚, 等. 71 °C 试验法寿命外推结果的影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(4): 35-39.

LI Fang, ZHANG Penghui, WANG Honggang, et al. Analysis of Influencing Factors on Life Extrapolation Results of 71 °C Test Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(4): 35-39.

作为火工品寿命评估的温度加速试验方法,最早写入1984年版美军标 MIL-STD-1576 (USAF)《空间系统用电爆分系统安全要求和试验方法》中,后续陆续出现在 AIAA-S-113—2005《发射及空间飞行器用爆炸系统及爆炸装置规范》及其修订版 AIAA-S-113—2016中,并在民兵 II 多型导弹的延寿中得到应用^[12-14]。国内在 1990 年,将其作为火工品试验方法中的一项国军标颁布执行,由于该方法原理易懂,程序简单,使用方便,因此自公布之日起,广泛用于各类火工品及爆炸系统的寿命评估,同时也被其他含能材料相关领域借用^[15-18]。

火工品密封方式的不同,对 71 °C 试验法进行火工品寿命评估时评估结果的准确性产生影响,如激光焊接的火工品可以采用,而对于弱密封的火工品则可能导致错误的评估结果^[19]。本文通过对 71 °C 试验法加速模型参数、方法的适用条件、外推环境温度取值等对火工品寿命评估结果的影响进行分析研究,对容易引起评估结果准确性的问题进行分析,给出 71 °C 试验法的使用建议。

1 71 °C 试验法及其寿命影响因素分析

国内使用的火工品加速寿命试验方法见 GJB 736.8《火工品试验方法 71 °C 试验法》。该标准是在 1990 年起草的,相当于美军标 MIL-STD-1576(USAF) 中的方法 3403。MIL-STD-1576(USAF) 中方法 3403 被称为高温贮存方法(High Temperature Storage Test)。MIL-STD-1576(USAF) 4.5.5 节中给出了“寿命”的一般要求,指出“电爆系统的设计应有足够的服役寿命,以确保在空间系统发射期内要求的时间点上能够可靠作用”。要求“火工系统的供应商应确认寿命敏感的材料、部件和元件,并提交其寿命监控计划,提出对分系统寿命监控要求,并按表 IV 和表 V 中的试验程序进行验证”,即“取 10 发电爆装置经过非破坏性试验、高温贮存(按方法 3403 进行)、冲击、振动、X-射线、中子射线、桥丝电阻、绝缘电阻、泄漏试验、不发火验证试验后,在规定的全发火电流下,进行发火试验合格,赋予产品 3 a 的使用寿命”。其中,发火试验分别在常温(4 发)、高温(3 发)和低温(3 发)条件下进行。

1.1 加速模型对寿命评估的影响

MIL-STD-1576(USAF) 中规定的高温贮存试验称为加速寿命试验(Accelerated Life Test)。该标准的方法 3403 中规定,将样品在温度 160 °F (71.1 °C)、湿度 40%~60%条件下,放置 30 d。试验后按式(1)给出的加速模型外推试验样品的贮存寿命。

$$H_L = H_T \times F^{(T_1 - T_2)/\Delta T}, \quad H_U = H_T \times F^{(T_1 - T_2)/\Delta T} \quad (1)$$

式中: F 为加速系数,取值为 3.0 或 3.25; ΔT 为

相关的温度增量,取值为 20 °F (11.11 °C); H_L 为 F 取 3.0 时外推的样品贮存寿命, d; H_U 为 F 取 3.25 时外推的样品贮存寿命, d; H_T 为试验时间,通常为 28~30 d; T_1 为试验温度, $T_1=160$ °F, 即 71.1 °C; T_2 为外推服役条件下的温度, °F。

式(1)的理论依据为 Arrhenius 模型。相关文献表明^[18],美国自 1984 年至今,在相关标准中一直采用该公式及相关参数,对装有含能部件和分系统(ECS)进行 3 a 服役寿命的验证。他们认为,该公式的推导及参数的确定依据目前已无从查证,虽然该公式及相关参数取值在美国也曾引起争议,但在美国新军用相关标准中,仍然采用了该公式和参数进行火工分系统的寿命外推和验证。

采用 GJB 736.8《火工品试验方法 71 °C 试验法》对火工品贮存寿命进行评估时,可采用式(2)进行外推。式(2)的理论依据仍为 Arrhenius 模型。

$$t_0 = t_1 \times r^{(T_1 - T_0)/A} \quad (2)$$

式中: r 为反应速率常数(加速系数),取 2.7; t_0 为常温贮存时间, d; t_1 为高温试验时间, d; T_1 为高温试验温度, K; T_0 为常温贮存温度, K; A 为与反应温度系数对应的温度变化,一般取 10 K。

现以某电雷管为例,采用国军标与美军标的方法分别进行贮存寿命外推。按国军标的方法,假设该电雷管在 71 °C 下贮存 28 d 后,进行作用时间测试,试验结果表明,该作用时间测试显著性检验为不显著。按标准中的常温 21 °C 外推计算常温下样品的贮存寿命,通过式(2)计算得到贮存寿命为 4 018 d,即 11 a。按美军标的方法,通过式(1)计算得到贮存寿命为 3 948 d,即 10.8 a。由计算结果可知,国军标与美军标的计算结果比较接近,可以认为国军标和国外的标准在加速模型方面的差异不大,加速模型对评估结果的影响的差异也不大,都是偏于保守的。

文献[5]表明,美国采用 71 °C 高温贮存试验,结合寿命监控,在 1997 年对已服役 30 a 的 MM II 用的一种火工品——推力终止装置进行了 39 d 的试验,给出了 5 a 的延寿期,并在 2002 年又用同样的方法又给出了 5 a 的延寿期,到 2007 年。类似地,美国采用同样的方法,在 2006 年对已服役 35 a 一个导弹型号用的小型点火器进行了 5 a 延寿^[6]。类似的工作国内也在进行。这些应用实例表明,71 °C 试验是能够满足火工品贮存寿命评估要求的。

1.2 试验条件对寿命评估的影响

71 °C 试验法是一个依据 Arrhenius 方程,从各种环境因素中抽出主要矛盾的加速寿命试验方法。由 Arrhenius 动力学理论可知,贮存温度越高,火工品的贮存寿命越短。因此,温度对火工品贮存寿命的加速作用非常明显,这也是 71 °C 试验法加速公式由高温下的试验时间推算出常温下贮存寿命的加速试验

机理。但是,在火工品的生产和库房贮存过程中,除温度外,常湿也是存在的。由于火工品大部分为胶密封火工品,其密封性是相对的,在高温试验过程中,不可避免地存在着微量的内外气氛的交换。在加速寿命试验过程中,为了保持火工品内部的湿气不被烤干,高温加上常湿更符合火工品的自然贮存状态。因此,在设计 71 °C 试验法的试验应力时,应考虑常湿对试验结果的影响。美军标中高温贮存试验的应力设计为:71 °C,40%~60%RH;而 GJB 736.8《火工品试验方法 71 °C 试验法》中的试验条件仅有温度,并未规定常湿。这种试验应力上的设计缺陷对于部分对湿度比较敏感的火工品的寿命评估结果也会产生一定的影响。

1.3 外推温度选取对寿命评估的影响

从文献[12]可知,美军标中是以 75 °F (23.9 °C) 为火工品贮存寿命外推贮存温度的,按标准在 160 °F 下试验 30 d 后,根据式(1)外推在 23.9 °C 下的贮存寿命是 8.76 a,但美国在实际应用时仍保守地取 3 a 贮存寿命。若以 3 a 为贮存寿命期限,进行倒推计算,则外推贮存温度取值为 35 °C。可见,美军标虽然使用 71 °C 试验法,但其给出火工品贮存寿命的结论极其保守。

国内在使用 GJB 736.8《火工品试验方法 71 °C 试验法》时,通常以在 71 °C 条件下试验 28 d 给出 10 a 的寿命为准。由上述条件利用公式(2)可反推出贮存温度取值为 21.9 °C。实际上,由 Arrhenius 动力学理论可知,不同的自然环境温度对火工品贮存寿命的影响不同,温度越高,寿命相对越短。因此,由 71 °C 试验公式进行火工品自然环境下贮存寿命计算时,应结合火工品实际的贮存环境温度进行自然温度取值,这样寿命评估结果更准确,也更符合实际。不同的自然环境温度取值下,71 °C 试验公式计算得到的贮存寿命如图 1 所示。

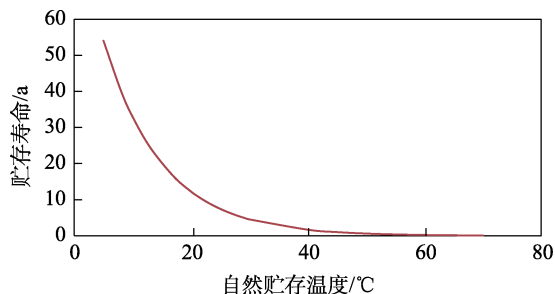


图 1 不同自然贮存温度取值与寿命外推结果的关系
Fig.1 Relationship between different natural storage temperature values and life extrapolation results

由自然贮存温度取值与寿命外推结果的关系可以看出,外推温度的取值对贮存寿命计算结果有着较大的影响。保持 71 °C 试验法加速公式中其他条件不

变,当自然贮存温度分别取 21、24、30 °C 时,由公式计算出的寿命分别为 11.1、8.2、4.5 a。

由于我国国土面积大,不同地域之间气候差异显著,而且同一区域不同季节的温差也较为显著,我国年平均气温变化曲线如图 2 所示。年平均气温变化较大的几个区域如图 3 所示。从图 2、图 3 中可以看出,自 20 世纪 90 年代以来,中国的平均气温增幅接近 1.5 °C,有些区域的平均气温增幅接近 3 °C。

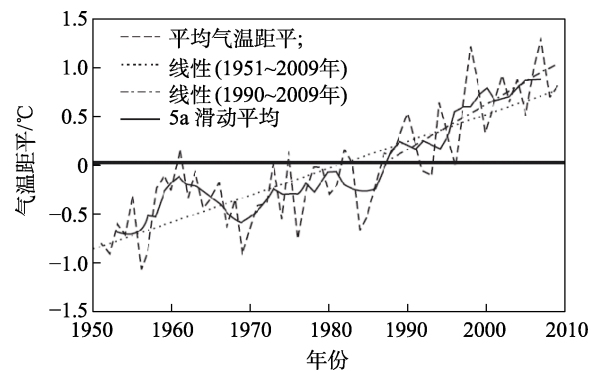


图 2 中国年平均气温变化曲线

Fig.2 Annual average temperature change curve in China

1.4 试验程序对寿命评估的影响

火工品在自然环境中贮存时,都不可避免地会受到温度和湿度两大应力的影响,在特殊的使用环境中,还存在着压力等应力的影响。因此,火工品的服役寿命评估是一个复杂的问题。综合考虑火工品在全寿命周期内的环境条件及其随时间的退化规律,才能给出比较准确的寿命预测。分析对比美军标与国军标的差别可知,美军标中一般不把火工品寿命评估看成一个独立的问题,而是放在综合试验程序中进行验证,以保证满足寿命设计的一般要求。如 MIL-STD-1576《航天系统电起爆子系统的安全要求和试验方法》、AIAA-S-113-2005《发射及空间飞行器用爆炸系统及爆炸装置规范》等。但一个共同点是 71 °C 试验法都是作为高温贮存试验方法,在包括无损检测、环境试验和功能试验等一系列试验程序后,用于寿命验证。因此,国外 71 °C 试验法的适用范围和使用对象明确,结合不同对象的试验程序要求,可操作性强。

GJB 736.8《火工品试验方法 71 °C 试验法》经常被单独使用,即对试验样品通过标准规定的 28 d 高温贮存试验,给出被试火工品 10 a 的寿命。若使用该标准时,对试验对象的密封特性和使用环境条件不加考虑,往往会得到与实际贮存寿命有一定偏差的结果。在这方面,GJB 736.8《火工品试验方法 71 °C 试验法》是有缺欠,待修订的。其缺欠主要表现在:GJB 736.8 规定的方法是以单一温度应力作为加速条件的,没有考虑湿度对试验对象的影响,这是造成密封结构不同的火工品在不同的贮存环境下寿命评估

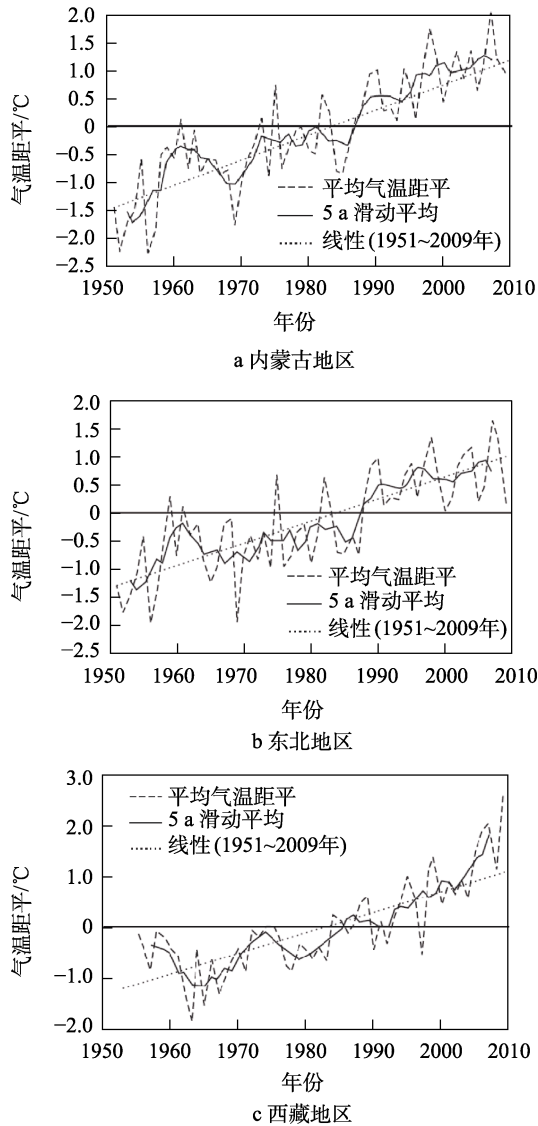


图3 年平均气温变化较大的几个区域

Fig.3 Several regions with significant changes in annual average temperature: a) Inner Mongolia; b) northeast; c) Xizang

存在差异的主要影响因素。因此, GJB 736.8 仅仅给出“本标准适用于已知加速系数条件下测定火工品的贮存寿命”, 没有明确给出其火工品结构等适用条件, 是造成 71 °C 试验法在部分产品中被误用, 从而导致其评估结果与自然贮存结果存在偏差, 进而引起对 71 °C 试验法评估结果准确性质疑的原因。由此可见, 71 °C 试验法是一种寿命设计和评估的验证方法, 与试验程序和试验湿度环境条件与火工品的结构相关, 一般不宜单独使用进行样品的寿命评估。

2 结论

通过对国军标和美军标中关于高温贮存试验的条款、使用场合、影响因素的分析, 可以得出以下结论。

1) 71 °C 试验法是基于 Arrhenius 模型的, 无论国军标还是美军标, 公式中的加速系数取值都偏保守。因此, 采用该方法对火工品进行寿命评估的结果是可信的, 该方法仍是目前最有效、方便使用的火工品寿命评估方法。

2) 71 °C 试验法是寿命设计和评估的试验验证方法, 具有一定的适用范围和使用程序, 不考虑适用范围, 脱离了试验程序, 独立使用会带来寿命评估结果的偏差。

3) 独立使用 71 °C 试验法进行寿命评估, 容易造成部分火工品寿命评估结果与实际使用中存在偏差的主要原因: 第一, GJB736.8《火工品试验方法 71 °C 试验法》未对试验湿度进行规定; 第二, 外推温度取值未结合实际使用条件。因此, 在使用 71 °C 试验法时, 应特别关注适用范围、试验程序、试验环境条件等, 特别是湿度条件和样品将来的使用环境, 必须进行综合考虑才能得到比较准确的结果。

参考文献:

- [1] 刘洪于. 基于模糊理论的导弹贮存使用环境分析[J]. 装备环境工程, 2020, 17(12): 95-100.
LIU H Y. Analysis of Missile Storage/Use Environment Based on Fuzzy Theory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(12): 95-100.
- [2] 滕克难, 韩建立. 海军战术导弹贮存延寿工程实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
TENG K N, HAN J L. Research on the Application for Tactical Missile Storage Life Extension Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020.
- [3] 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 F G, CUI X T, HONG L. Influencing Factor Analysis of Storage Life of Missile Initiating Explosive Devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 24-27.
- [4] 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 S N, WU X, YAN S Y, et al. Influencing Mechanism of Storage /Use Environment on Missile Performance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 17-22.
- [5] 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]. 光电与控制, 2015, 22(2): 94.
WANG P, HU C H, HOU L A, et al. Storage Life Prediction of Weapons and Military Equipment Considering the Impact of Measurement[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(2): 94.
- [6] BAGHESTAN K, REZAEI S M, ALI TALEBI H, et al. An Energy-Saving Nonlinear Position Control Strategy for Electro-Hydraulic Servo Systems[J]. ISA Transactions, 2015, 59: 268-279.

- [7] 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 C Y, ZHAO X L, YANG Y F, et al. Study on Single Stress Level Accelerated Life Test of Guided Ammunition Initiating Device[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5): 29-31.
- [8] 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 Y D, YU W B, XUAN Z L, 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.
- [9] SINDELAR R L, LAM P S, DUNCAN A J, et al. Development and Application of Materials Properties for Flaw Stability Analysis in Extreme Environment Service[C]// Volume 6: Materials and Fabrication. San Antonio: ASMEDC, 2007.
- [10] 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 R, LI F, DU Z H, et al. Study on Storage Characteristics of Electric Initiating Explosive Device at Single Temperature[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 329-333.
- [11] GJB 736.8—90, 火工品试验方法 71 °C 试验法[S].
GJB 736.8—90, Initiating Explosive Device Method of the Test at 71 °C[S].
- [12] MIL-STD-1576(USAF), Electroexplosive Subsystem Safety Requirements and Test Methods for Space Systems[S].
- [13] LIEN C Y. Correlation between the Accelerated Aging Test (AAT) and Real World Storage Temperature[C]// Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Cincinnati: AIAA, 2007.
- [14] AIAA S-113-2005, Criteria for Explosive Systems and Device on Space and Launch Vehicles[S].
- [15] 丰雷. 某弹用电子部件贮存寿命评估[J]. 装备环境工程, 2016, 13(6): 114-119.
FENG L. Storage Life Assessment of Electronic Component in a Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(6): 114-119.
- [16] 秦强, 张生鹏. 综合环境条件下电子装备贮存寿命加速试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 81-87.
QIN Q, ZHANG S P. Accelerated Storage Test of Electric Equipment under Integrated Environmental Stresses[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 81-87.
- [17] 马浩文, 熊勇, 吴李淳. 基于全寿命周期的拦截弹贮存寿命评估方法[J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(5): 665-670.
MA H W, XIONG Y, WU L C. Method of Storage Life Assessment of Intercept Missile Based on Whole Life Cycle[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2022, 30(5): 665-670.
- [18] 刘晓娣, 韩建立, 姜普涛. 弹上电子部件加速因子估计方法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 7-12.
LIU X D, HAN J L, JIANG P T. Acceleration Factor Estimation of Missile-Borne Electronic Components[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 7-12.
- [19] 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: 军械工程学院出版社, 2009.
ZHAO Ran, Accelerated Life Test Method with Known Life Similar Products[D] Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2009.