

多应力下电子引信薄弱部件加速寿命模型研究

罗文新¹, 岳明凯¹, 张骢^{1,2*}, 张成¹, 史瑞¹

(1.沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159; 2.北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

摘要: **目的** 给出海岛环境下某电子时间引信的寿命分布规律, 研究引信的薄弱部件位置和引信寿命的影响因素。**方法** 通过引信的工作原理, 初步筛选出引信的薄弱部件, 分析海岛环境下影响引信贮存可靠性的环境因素, 根据引信的敏感环境应力, 设计相应的加速试验, 来验证引信的薄弱部件位置。提出一种将腐蚀动力学模型和 Peck 模型结合的多应力加速模型, 通过加速试验结果, 估计出模型未知参数, 得到引信的寿命分布规律。最后通过加速模型, 预测实际海岛贮存环境下的引信寿命。**结果** 根据恒温、湿热、盐雾加速试验的加速结果, 得到电子时间引信的薄弱部件为电路中的电子开关器件和时间装定环, 引信的寿命分布规律服从威布尔分布函数。通过将腐蚀动力学和湿热加速模型相结合的加速模型, 多应力加速模型预测得到海岛环境下的引信贮存寿命为 10.13 a, 更符合实际情况, 预测精度为 1.4%。**结论** 多应力加速试验更符合引信的实际贮存环境, 基于湿热应力和盐雾应力的加速模型能准确预测海岛环境多应力影响下引信的贮存寿命。

关键词: 引信; 加速寿命模型; 薄弱部件; 寿命预测; 多应力; 海岛环境

中图分类号: TJ430.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)12-0028-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.004

Accelerated Life Model of Weak Components of Electronic Fuze under Multiple Stresses

LUO Wenxin¹, YUE Mingkai¹, ZHANG Cong^{1,2*}, ZHANG Cheng¹, SHI Rui¹

(1. School of Equipment Engineering, Shenyang Polytechnic University, Shenyang 110159, China; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: The work aims to present the life distribution law of an electronic time fuze under the sea island environment and study the location of the weak components of the fuze and the factors affecting the life of the fuze. The weak components of the fuze were initially screened out through the working principle of the fuze, and the environmental factors affecting the reliability of the fuze storage in the sea island environment were analyzed. An accelerated test was designed according to the sensitive environmental stress of the fuze to verify the location of the weak components. A multi-stress accelerated model combining corrosion kinetics model and Peck model was proposed, and the unknown parameters of the model were estimated by the accelerated test results, thereby obtaining the life distribution law of the fuze. Finally, the life of the fuze in the sea island storage environment was predicted by the accelerated model. The constant temperature, humidity and salt spray accelerated test results were used to accelerate the results, and the weak components of the fuze were identified as the electronic switching devices in the cir-

收稿日期: 2024-10-02; 修订日期: 2024-11-26

Received: 2024-10-02; Revised: 2024-11-26

引文格式: 罗文新, 岳明凯, 张骢, 等. 多应力下电子引信薄弱部件加速寿命模型研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 28-33.

LUO Wenxin, YUE Mingkai, ZHANG Cong, et al. Accelerated Life Model of Weak Components of Electronic Fuze under Multiple Stresses[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 28-33.

*通信作者 (Corresponding author)

circuit and the time setting ring. The life distribution law of the fuze obeyed the Weibull distribution function. The accelerated model combining the corrosion kinetics and humidity accelerated model could predict the storage life of the fuse in the sea island environment to be 10.13 a with a prediction accuracy of 1.3%. The multi-stress acceleration test is more consistent with the actual storage environment of the fuze, and the acceleration model based on wet thermal stress and salt spray stress can accurately predict the storage life of the fuze under the impact of multiple stresses in island environment.

KEY WORDS: fuze; accelerated life model; weak components; life prediction; multiple stresses; island environment

引信作为弹药控制系统的关键部件,其具备自主探测、识别目标及敏感环境的能力,并能利用网络平台信息进行解保控制。引信在大部分的时间里,都是处于贮存状态,所以引信在贮存环境内的可靠性水平是武器系统能否完成预期作战任务的关键^[1-3]。

引信贮存寿命的预测方法分为 2 种,一种是实际贮存环境试验评估法,该方法由于试验周期长,无法快速评估出引信贮存寿命;另一种加速寿命试验评估法很好地弥补了实际贮存环境法的不足,大大缩短了试验周期。其方法是通过施加更高的环境应力来进行寿命试验,是加速寿命试验常使用的一种方法^[4-6]。但目前对于引信加速寿命试验的设计中,大多都只考虑了单温度因素的加速试验,而引信是由多种元器件构成的复杂产品,其失效模式多种多样,并且引信在实际贮存环境下影响其贮存可靠性的环境因素并不是单一的,所以进行多应力下的引信加速寿命试验是有必要的。目前,国内学者关于加速寿命试验的研究主要集中在温度应力和湿度应力对贮存可靠性影响^[7-9],而故障往往发生于长期贮存在海岛、边境地区等复杂环境的引信上。此类环境往往包括多种环境应力,其中对引信贮存可靠性影响较大的环境应力为盐雾应力。常用的盐雾应力加速寿命模型并没有考虑多应力作用的情况,而包括盐雾应力的引信多应力加速寿命模型的相关研究较少。

针对上述问题,本文以某电子时间引信为研究对象,通过引信的工作原理判断出引信的薄弱部件。根据引信在海岛环境下的敏感应力,设计加速试验,确定引信的寿命分布规律,并对引信的薄弱部件进行验证。针对传统盐雾加速模型中腐蚀电流难以测量的问题,提出一种基于腐蚀动力学模型与湿热加速模型相结合的多应力加速模型。利用多应力加速试验的结果,得到多应力加速模型中的未知参数,通过加速模型预测海岛环境下的引信贮存寿命,为多应力下的引信寿命预测提供参考方案。

1 引信薄弱部件分析

由于新时代作战需求,某电子时间引信需要长期贮存在海岛环境,但在测试过程中发现,部分装载该引信的弹药出现哑弹现象,未能达到设计书的贮存时间标准。根据可靠性领域的相关研究,认为产品失效

首先在薄弱环节产生,所以对该引信的薄弱部件进行初步筛选。

通过对电子时间引信的工作流程进行分析,该引信有 3 道保险,第一级保险为后座保险,经过外场实验测试,后座保险仍能正常工作,另外 2 道保险分别为空气动力学保险和延期解除保险,都是通过引信电路进行控制。引信电路的作用为读取时间装定信息和外部环境信息,在合适的可靠解保距离解除空气动力学保险,并在装定时间时输出点火信号,延期解除保险机构收到解保信号后,引信作用。初步判定该电子时间引信的薄弱部件为引信电路部件,但仍需开展加速试验进行验证,并引信贮存寿命重新评估,进而发现引信在海岛环境下失效机理和失效模式,以便后续为引信的改进或维修提供依据。

2 引信贮存可靠性影响因素

为了更好地模拟海岛贮存环境,需要对海岛贮存环境影响引信贮存可靠性的环境因素进行分析。通过梳理分析海岛环境下的气候特点,得到海岛环境对影响引信贮存可靠性的环境因素主要有温度、湿度和盐雾应力^[10],而其他诱发环境因素对贮存状态下的引信影响很小。下面分析温度、湿度、盐雾应力对可靠性的影响。

根据国内学者的统计,由于温度应力导致电子装备失效的占比在 50%左右^[11-12]。海岛环境的温度特点:年平均温度为 26 °C,最高温度可达 40 °C,日温差较小。因此,在长期贮存的过程中,温度应力会对引信的可靠性产生影响。温度对引信的影响主要有 2 种,一种为温度变化对引信中电子元器件的物理结构的影响,由于元器件的组成材料不同,其热膨胀系数不同,使得元器件结构失效,从而导致元器件的电学性能失效,使得引信无法正常工作。另一种为温度对材料物理变化和化学变化的加速作用,温度越高,材料的老化速度和腐蚀速度越快,引信的可靠性也会下降得越快。

湿度也是影响引信贮存可靠性的因素。由于引信需要长期贮存,引信的金属材料不可避免地会吸潮,导致引信金属部件表面生成液滴,液滴再吸收二氧化碳气体产生电解液,使得引信金属部件发生电化学腐蚀,影响引信的性能,导致引信无法正常工作。引信

的非金属部件同样也会吸潮,吸潮后的非金属结构会产生霉菌,霉菌会加速引信材料的老化速度,导致引信结构的破坏以及引信功能的丧失。当湿度高于引信材料的临界湿度时,其腐蚀速度会快速增加。引信金属腐蚀物增量与温度、湿度的关系如图1所示^[10]。

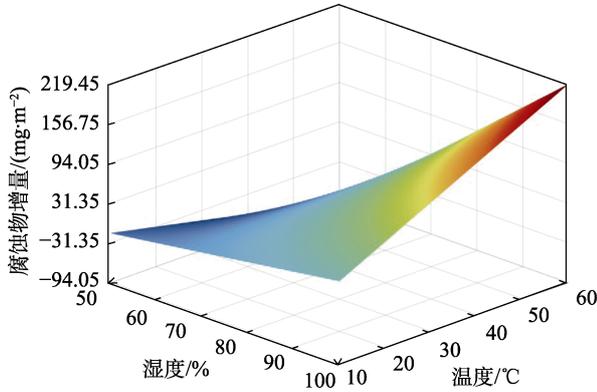


图1 引信腐蚀物增量与温度、湿度的关系
Fig.1 Relationship between fuze corrosion increment and temperature and humidity

从图1中可以看出,当温度、湿度共存时,当湿度大于60%时,腐蚀会进一步加快,而通常海岛环境下湿度常大于60%。另外,温度会加速材料的化学变化,高温高湿综合应力作用下会进一步加速引信的腐蚀速度,导致引信的贮存可靠性下降。

盐雾成分会与空气中的水分形成电解质,加剧引信金属部件的电化学腐蚀,从而导致弹药的工作性能受损。如腐蚀物会降低引信表面光洁度,弹药射击精度受损。除此之外,盐雾成分会导致引信电子部件的电学性能下降,使得引信电路系统无法工作,造成弹药哑弹,早炸等现象。

研究表明,单应力的加速试验与多应力的加速试验相比,单应力作用下加速引信失效的效果明显低于多应力的加速试验^[13]。因此,开展传统的单应力加速试验与多应力加速试验,并对分析引信在各加速试验的失效原因,找出引信在海岛环境下贮存时的薄弱部件,为以后引信的延寿和改进提供一定的参考。

3 加速寿命模型的建立

3.1 基本假设

假设1:引信的贮存寿命 t 服从某一特定分布。

假设2:在不同的应力水平下,引信在加速试验环境下的失效机理与实际贮存环境下的失效机理保持一致。

假设3:引信可根据敏感应力类型,可通过对应的加速模型计算得到引信的特征寿命^[14]。

3.2 加速模型

关于温度应力的加速试验中常采用阿伦尼斯模

型作为引信的加速模型^[15-16],其表达式为:

$$\ln \eta = \ln A_1 + \frac{E_a}{kT} \quad (1)$$

式中: η 为引信特征寿命; A_1 为未知常数; E_a 为激活能,eV; k 为玻尔兹曼常数, $k=8.62 \times 10^{-5}$ eV/K; T 为热力学温度,K。

激活能在引信可靠性领域是指引信从正常工作到失效所需的能量。调研国内外关于装备电子产品的加速应力试验^[17-18],归纳得到典型电子产品的激活能常在0.5~0.7 eV。

温度应力的加速因子表达式为:

$$T_{AF} = \frac{\eta_0}{\eta_1} = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \quad (2)$$

式中: η_0 为实际贮存环境下的特征寿命; η_1 为加速应力下的特征寿命; T_0 为实际贮存环境下的热力学温度,K; T_1 为加速应力下的热力学温度,K。

温度与湿度共同作用下,引信的失效关于湿度与温度共同作用的模型,常使用Peck提出的Hallberg-Peck加速模型^[19-20],其表达式如下。

$$\ln \eta = \ln A_2 - B_1 \ln R_H + \left(\frac{E_a}{kT} \right) \quad (3)$$

式中: η 代表的是引信湿热试验下的特征寿命; R_H 是相对湿度,%; T 为热力学温度,K; A_2 、 B_1 均为未知参数,其中 B_1 为湿度对引信失效的加速率常数,取值范围为2~3。

则温湿加速模型的加速因子为:

$$A_F = \left(\frac{R_{H0}}{R_{H1}} \right)^{-B} \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \quad (4)$$

式中: R_{H0} 为实际贮存环境湿度; R_{H1} 为加速试验环境湿度。

盐雾应力会加速引信的电化学腐蚀现象,所以国内学者常利用法拉第定律来对腐蚀累积效应进行描述^[21],表示为:

$$Q = \frac{1}{F} \int_0^t I_c dt \quad (5)$$

式中: Q 为引信腐蚀量; F 为法拉第常数; I_c 为引信腐蚀电流; t 为腐蚀电流作用时间。

由于腐蚀电流不能直接测得,且腐蚀电流和腐蚀速率的关系受多个系统变量的影响,如引信材料、温度、溶液状态、腐蚀表面状态,作用时间等,所以不适合作为引信这种结构复杂、材料多样的装备产品的加速模型。除法拉第定律外,腐蚀动力学幂函数模型能很好地反映腐蚀量与时间的关系^[22],其表达式如下,

$$Q = Q_1 t^n \quad (6)$$

式中: Q_1 为第1年的腐蚀量; t 为环境作用时间; n 为常数,代表腐蚀产物对引信的保护作用。

以腐蚀量相等原则可得出引信贮存时间和加速

试验的比值, 即加速因子:

$$\frac{t_0}{t_1} = n \sqrt[n]{\frac{Q_{s1}}{Q_{s0}}} \quad (7)$$

根据盐雾对引信的贮存可靠性的影响可以得知, 盐雾对引信的作用机理与湿度类似, 都是加快引信部件的腐蚀速度。结合文献关于加速模型的研究^[23], 提出将腐蚀动力学模型和湿热加速模型结合, 得到考虑温度、湿度、盐雾应力的加速模型, 其公式为:

$$\ln \eta = \ln A_3 - B_2 \ln R_H - N \ln q + \left(\frac{E_a}{kT} \right) \quad (8)$$

式中: η 代表的是引信盐雾试验下的特征寿命; q 为盐溶液浓度; E_a 为激活能, eV; R_H 是相对湿度, %; T 为热力学温度, K; A_3 、 B_2 均为未知参数; N 为盐雾浓度的加速率常数。

盐雾试验的加速因子则为:

$$AF = \left(\frac{R_{H0}}{R_{H1}} \right)^{-B} \left(\frac{q_0}{q_1} \right)^{-N} \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \quad (9)$$

3.3 寿命模型及其参数估计

在国内关于引信加速试验研究中常用威布尔分布去描述引信寿命的分布特性^[24-25]。该分布适合于描述引信系统内某个部分或多个部分失效导致整体失效的情况。其分布函数为:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(t / \eta \right)^m \right] \quad (10)$$

式中: m 为威布尔分布的形状参数; η 为尺寸参数。两参数数值变化使得威布尔分布的函数形状多种多样, 使得威布尔分布在寿命预测模型中应用十分广泛。引信的对数似然函数为:

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \left[\ln m + (m-1) \ln t_i - m \ln \eta - \left(t_i / \eta \right)^m \right] + \sum_{i=1}^n \left[- \left(t_i / \eta \right)^m \right] \quad (11)$$

分别对威布尔分布的未知参数求偏导, 可得方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{m} + \ln t_i - \ln \eta - \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^m \ln \left(\frac{t_i}{\eta} \right) \right] + \\ \sum_{i=1}^n \left[- \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^m \ln \left(\frac{t_i}{\eta} \right) \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^n \left[\frac{m}{\eta} + \left(\frac{m}{\eta} \right) \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^m \right] + \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{m}{\eta} \right) \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^m \right] = 0 \end{cases} \quad (12)$$

求解上述方程组即可得到分布函数的参数估计值, 然后对引信寿命进行等效计算。

4 多应力加速寿命模型验证

引信加速试验采用恒定温度加速试验。选取 3 组应力水平, 70 °C 为初始加速应力, 步长为 5 °C, 以

保证加速应力下的引信失效机理与实际贮存环境下的应力相同。湿热试验同样设置 3 组应力水平, 温度应力水平与恒温加速试验一致, 湿度加速应力, 选择湿度 85% 为初始加速应力, 步长为 5%。盐雾加速试验中温度与湿度加速应力条件与湿热加速试验一致, 根据盐溶液浓度与电导率的关系, 选择盐溶液浓度 5% 为最高应力水平, 步长选择 2%。通过上述应力水平开展加速试验, 各组试验的引信样本量为 10。

统计试验结果得到该引信的失效模式, 见表 1。造成试验引信的故障主要有 2 种, 一种引信电路里的电子开关器件损坏, 电路控制芯片输出的点火信号无法导通开关器件, 将充电电容的能量传递给电点火头和电作动器, 从而导致空气动力学保险和延期解除保险无法按照预定条件解保。另一种时间装定环生锈, 使得装定电阻网络短路, 引信电路无法读取装定信息, 从而导致引信装定失效。通过加速试验结果的故障与实际贮存的引信的故障进行对比, 得到海岛环境下的引信薄弱部件为引信电子开关器件和时间装定环。

表 1 电子时间引信故障模式
Tab.1 Failure mode of electronic time fuze

故障模式	故障影响	故障原因
无发火信号输出	引信哑火	引信电子开关器件损坏
装定电阻网络短路	装定失效	装定环内部生锈
计时误差增大	电路振荡器频率下降	晶振性能降低
引信电路短路	引信哑火	焊点脱落

在恒温加速试验中, 引信故障主要发生在引信电子开关器件上, 长时间的温度作用下会导致电子开关器件的电学性能下降, 开关器件无法导通或导通不完全。在湿热加速试验与盐雾加速试验中, 引信故障主要发生在时间装定环腐蚀, 湿度应力与盐雾应力通过时间装定环之间的缝隙作用在时间装定环的内部, 导致装定环内部的电阻网络腐蚀短路。从上述加速试验结果可以得出, 相比单应力的加速试验, 多应力的加速试验更能模拟实际海岛贮存环境, 激发出引信的薄弱环节。利用各加速试验数据, 根据极大似然法求得各加速试验下寿命模型的形状参数 m 和尺寸参数 η , 见表 2。

表 2 不同加速试验下的寿命模型参数先验值
Tab.2 Prior values of life model parameters under different acceleration tests

参数	恒温加速试验	湿热加速试验	盐雾加速试验
形状参数 m	2.51	1.64	1.72
尺寸参数 η	3 776.89	2 256.35	1 383.56

为了进一步提高引信加速寿命模型的预测精度, 根据表格内的模型先验值, 采用蒙特卡洛方法对先验分布进行采样, 优化引信加速模型参数。通过多次迭

代,逐步更新引信加速模型的参数值,使得模型能够更好地拟合数据。最后得到各加速试验下的寿命分布如图2所示。

根据图2可以看出,通过威布尔分布能够较好地拟合了各加速试验下的引信失效数据,并结合各加速试验结果求解得出相应加速模型的参数估计值为

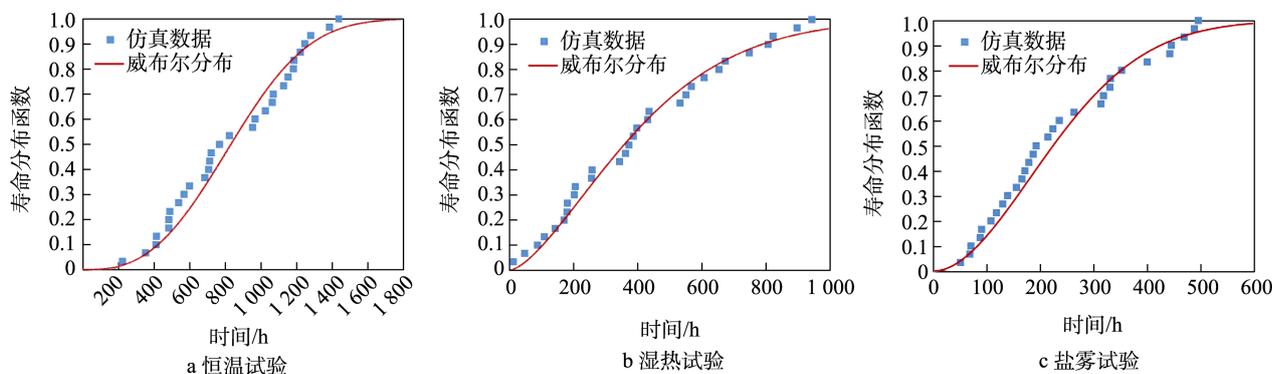


图2 各加速试验的引信寿命分布

Fig.2 Life distribution diagram of fuze for each acceleration test: a) constant temperature test; b) wet thermal test; c) salt spray test

根据历史经验可知,该引信在海岛环境下的平均故障时间为10 a。对比阿伦尼斯模型、Peck模型和盐雾多应力加速模型的寿命估计结果,由于阿伦尼斯模型只考虑了温度对引信贮存可靠性的影响,因此得到的寿命预测结果不符合实际海岛环境下的引信贮存寿命。Peck模型考虑了温度和湿度对引信的影响,其寿命预测结果相较于阿伦尼斯模型更接近实际情况,但寿命预测结果误差较大。盐雾多应力加速模型考虑了温度、湿度和盐雾应力对引信的影响,因此其寿命预测结果更接近实际海岛环境的引信寿命,且预测误差在1.2%左右。

5 结论

文中研究了海岛环境下影响电子时间引信寿命的敏感应力,以此开展引信的单应力加速试验与多应力加速试验,得到引信在海岛环境下的寿命分布规律,并提出一种将腐蚀动力学模型和湿热加速模型结合,结合相应的加速模型对引信进行寿命评估。

1) 实际海岛贮存环境下,影响引信寿命的环境因素较多,相比单应力的加速试验,多应力的加速试验能够模拟海岛实际贮存环境引信的失效模式。

2) 根据引信在海岛环境下所受敏感应力,开展相应的加速试验,利用各加速试验的试验结果得到模型的未知参数,通过加速模型对实际海岛贮存环境的引信寿命进行预测,多应力加速模型的预测结果更符合实际结果。

3) 通过多应力的加速试验结果,与单应力的试验结果对比更能快速发现引信在实际贮存中的薄弱部件,为引信的改进与延寿提供依据。

$A_1=e^{-11.51}$, $A_2=e^{-8.4}$, $A_3=e^{-15.24}$, $B_1=2.91$, $B_2=2.96$, $N=0.53$ 。根据模型估计值可计算出各加速试验对应的实际贮存环境下的加速因子,取海岛环境下的贮存条件为 $T=297$ K, $R_H=85\%$, $q=0.004\%$, 计算得出引信正常贮存环境下阿伦尼斯模型、Peck模型和盐雾多应力加速模型的寿命估计结果分别为17.21、12.64、10.12 a。

参考文献:

- [1] 张合. 引信与环境[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(1): 1-5.
ZHANG H. Fuze and Environment[J]. Journal of Detection & Control, 2019, 41(1): 1-5.
- [2] 马宝华. 现代引信的控制功能及特征[J]. 探测与控制学报, 2008, 30(1): 1-5.
MA B H. Control Function and Characteristics of Modern Fuzes[J]. Journal of Detection & Control, 2008, 30(1): 1-5.
- [3] ZHAO Q Q, YUN W Y. Storage Availability of One-Shot System under Periodic Inspection Considering Inspection Error[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 186: 120-133.
- [4] 彭京川, 胥泽奇, 张世艳, 等. 军用涂层海洋大气自然环境试验方法与要求[J]. 装备环境工程, 2017, 14(6): 122-125.
PENG J C, XU Z Q, ZHANG S Y, et al. Marine Atmosphere Natural Environment Test Methods and Requirements of Military Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(6): 122-125.
- [5] 肖敏, 赵全成, 杨华明, 等. 硅橡胶自然环境加速试验方法与自然环境试验方法等效性研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(11): 71-78.
XIAO M, ZHAO Q C, YANG H M, et al. Equivalence between Natural Environmental Accelerated Test Methods and Natural Environmental Test Methods of Silicone Rubber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(11): 71-78.
- [6] 刘艳, 刘艺, 陈江攀, 等. 导弹自然环境适应性综合评价方法[J]. 现代防御技术, 2021, 49(3): 123-129.
LIU Y, LIU Y, CHEN J P, et al. Comprehensive Evaluation Method of Missile's Natural Environment Adaptation

- bility[J]. *Modern Defence Technology*, 2021, 49(3): 123-129.
- [7] 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.
- [8] 刘伟钊, 李蓉. 基于性能退化的机电引信部件贮存寿命评估方法[J]. *探测与控制学报*, 2022, 44(3): 17-21.
LIU W Z, LI R. Storage Life Evaluation of Electromechanical Fuze Components Based on Performance Degradation[J]. *Journal of Detection & Control*, 2022, 44(3): 17-21.
- [9] 张国龙, 蔡金燕, 梁玉英, 等. 电子装备多应力加速退化试验技术及可靠性评估方法研究[J]. *航空学报*, 2013, 34(12): 2815-2822.
ZHANG G L, CAI J Y, LIANG Y Y, et al. Research on Reliability Assessment Method of Electronic Equipment Based on Multi-Stress ADT[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(12): 2815-2822.
- [10] 柳爱利, 寇方勇. 海洋环境对舰载导弹贮存可靠性影响分析[J]. *海军航空工程学院学报*, 2013, 28(3): 285-288.
LIU A L, KOU F Y. Analysis of Storage Reliability of Shipborne Missiles in Marine Environment[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2013, 28(3): 285-288.
- [11] 莫郁薇. 热应力对半导体分立器件失效率的影响[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 1996, 14(5): 25-31.
MO Y W. Influence of Thermal Stress on Failure Rate of Semiconductor Discrete Devices[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 1996, 14(5): 25-31.
- [12] 王琦, 王洁. 舰载装备环境适应性协同设计方法研究[J]. *装备环境工程*, 2010, 7(1): 64-67.
WANG Q, WANG J. Research on Collaborative Design Method of Environmental Worthiness of Ship-Borne Equipment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(1): 64-67.
- [13] 林震, 张爱民. 综合环境应力试验初探[J]. *环境技术*, 2002, 20(3): 1-4.
LIN Z, ZHANG A M. Study on Combined Environment Stress Test[J]. *Environmental Technology*, 2002, 20(3): 1-4.
- [14] 卢秋红, 董少峰, 张亚. 弹药步进应力加速寿命试验数据处理方法探讨[J]. *探测与控制学报*, 2000, 22(1): 47-50.
LU Q H, DONG S F, ZHANG Y. The Study on the Data-Processing Method of Ammunition Stepstress Accelerated Life Tests[J]. *Journal of Detection & Control*, 2000, 22(1): 47-50.
- [15] ARRHENIUS S. Über Die Dissociationswärme Und Den Einfluss Der Temperatur Auf Den Dissociationsgrad Der Elektrolyte[J]. *Zeitschrift Für Physikalische Chemie*, 1889, 4U(1): 96-116.
- [16] LIBRE T C. The Arrhenius Law-Activation Energies[C]// 2013 International Conference on Electronic Packaging Technology. [s. l.]: IEEE, 2022.
- [17] 刘佩风, 王毅飞, 白明明, 等. 电子整机加速贮存试验及寿命评估方法研究[J]. *强度与环境*, 2018, 45(1): 57-62.
LIU P F, WANG Y F, BAI M M, et al. Study on Storage Accelerated Aging Test and Life Assessment of Assembly Product[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2018, 45(1): 57-62.
- [18] 赵蕾, 陈龙, 谢阳, 等. 电机控制器电子器件可靠性研究[J]. *电子设计工程*, 2014, 22(18): 142-144.
ZHAO L, CHEN L, XIE Y, et al. Research on Reliability of Motor Controller Electronics[J]. *Electronic Design Engineering*, 2014, 22(18): 142-144.
- [19] 周洁, 姚军, 苏泉, 等. 综合应力加速贮存试验方案优化设计[J]. *航空学报*, 2015, 36(4): 1202-1211.
ZHOU J, YAO J, SU Q, et al. Optimum Design of Accelerated Storage Test Plan under Multiple Stresses[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(4): 1202-1211.
- [20] ESCOBAR L A, MEEKER W Q. A Review of Accelerated Test Models[J]. *Statistical Science*, 2006, 21(4): arXiv: 0708.0369.
- [21] 赵朋飞, 苏晓庆, 吴俊升. 典型岛礁大气环境室内加速腐蚀试验谱研究[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(12): 14-21.
ZHAO P F, SU X Q, WU J S. Accelerated Corrosion Test Spectrum of Typical Reef Atmospheric Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(12): 14-21.
- [22] FRANKENTHAL R P, MILNER P C, SICONOLFI D J. Long-Term Atmospheric Oxidation of High Purity Iron[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(5): 1019-1021.
- [23] 李晓阳, 姜同敏. 加速寿命试验中多应力加速模型综述[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(5): 828-831.
LI X Y, JIANG T M. Review of Multiple-Stress Models in Accelerated Life Testing[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(5): 828-831.
- [24] 中国人民解放军总装备部. 弹药元件加速寿命试验方法: GJB 5103—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
General Armaments Department of the People's Liberation Army. Accelerated Life Test Method of Ammunition Components: GJB 5103—2004[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [25] 姚松涛, 崔洁, 赵河明, 等. 引信步进应力加速试验贮存寿命预测研究[J]. *装备环境工程*, 2024, 21(2): 51-58.
YAO S T, CUI J, ZHAO H M, et al. Storage Life Prediction of Fuze under Step Stress Accelerated Test[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2024, 21(2): 51-58.