

航空航天装备

一种基于综合环境剖面的导弹弹上设备加速贮存试验方法

张仕念, 杨维忠, 夏克寒, 颜诗源, 戢中东

(北京市海淀区西北旺镇北清路 109 号 24 分队, 北京 100094)

摘要: **目的** 基于导弹武器在历经地面使用载荷后, 还要满足飞行载荷的特点, 讨论用于评估导弹弹上设备贮存期的加速贮存试验流程与方法。**方法** 开展加速因子试验, 获得加速因子计算公式, 根据实际使用环境载荷, 制定综合环境试验剖面, 按照贮存期目标值开展加速贮存试验, 等效地面使用环境载荷, 开展飞行环境载荷考核试验, 试验成功后, 给出贮存期评估结论。**结果** 该方法在多型导弹贮存延寿工程的弹上设备贮存期评估中得到应用, 应用表明, 可以评估导弹弹上设备的贮存期, 具有工程应用价值。**结论** 获得加速因子计算公式后, 将导弹弹上设备的地面使用环境载荷累计影响与能够经受飞行载荷环境分步进行试验, 能够体现导弹弹上设备历经的环境载荷, 可以用于弹上设备的贮存期评估。

关键词: 导弹; 加速贮存试验; 综合环境剖面; 贮存期

中图分类号: TJ760; V216

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)12-0060-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.12.010

Accelerated Storage Test Method for Missile Equipment Based on Comprehensive Environmental Profile

ZHANG Shi-nian, YANG Wei-zhong, XIA Ke-han, YAN Shi-yuan, JI Zhong-dong

(Division 24, No. 109, Beiqing Road, Xibeiwang Town, Haidian District, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: The work aims to discuss the accelerated storage test process and method for evaluating the storage term of missile equipment in view of that missile must withstand flight environment load after bearing ground load during service. The accelerated test was carried out to obtain the calculation formula of accelerated factor. The comprehensive environmental test profile was formulated based on actual service environment load. According to the target value of storage term, the accelerated storage test was conducted. The equivalent service environment load on ground was simulated to carry out assessment test of flight environment load. After the test, the evaluation results of storage term were obtained. The method was applied to evaluate the storage term of missile equipment in polytype missiles' storage life extending project. From the application results, the method could be used to evaluate the storage term of missile equipment and had application value in engineering. After the calculation formula of accelerated factor is obtained, the accumulated effects of service environment load on ground and the ability to withstand the flight environment load are tested step by step, reflecting that the method can evaluate the storage term of mis-

收稿日期: 2021-11-16; 修订日期: 2021-12-17

Received: 2021-11-16; Revised: 2021-12-17

作者简介: 张仕念 (1976—), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为可靠性与延寿技术。

Biography: ZHANG Shi-nian (1976-), Male, Master, Associate researcher, Research focus: reliability and storage life extension technology.

引文格式: 张仕念, 杨维忠, 夏克寒, 等. 一种基于综合环境剖面的导弹弹上设备加速贮存试验方法[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 060-065.

ZHANG Shi-nian, YANG Wei-zhong, XIA Ke-han, et al. Accelerated Storage Test Method for Missile Equipment Based on Comprehensive Environmental Profile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 060-065.

sile equipment after bearing the environment load.

KEY WORDS: missile; accelerated storage test; comprehensive environmental profile; storage term

导弹的贮存延寿是一项具有持续时间长、经费投入大、综合效益高等特点的重大长效工程,受到国内外的广泛关注^[1-4]。加速贮存试验是贮存延寿的重要途径^[5-11],可以用于提前评估弹上产品的寿命^[12-16],在石英加速度计^[17]、金属减振器^[18]、天馈系统^[19]、惯性器件^[20]、冲压发动机^[21]、伺服涡轮泵密封膜片^[22]、天线^[23]、空空导弹电子部件^[24]、开关电源^[25]等航空航天及民用产品上到广泛应用。加速贮存试验是在不改变产品失效机理的前提下,通过加大应力加速产品失效,根据加速模型计算得出正常应力水平下的贮存寿命。GB 2689—81《恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法》用于指导电子元器件等产品的加速寿命试验,主要适用于在地面使用的产品,应用广泛。

导弹弹上设备具有长期贮存、飞行环境恶劣的特点,即在经历长期的地面贮存和使用载荷后,还需要满足飞行环境载荷要求,而是否满足飞行载荷要求,通常在组件以上层级产品进行试验考核。因此,常规的方法用于弹上材料、元器件的加速贮存试验是有效的,用于弹上部组件、整机的加速贮存试验时,存在以下问题:在试验过程中出现故障或退化时,可以获得加速因子和在地面使用的贮存期,由于没有经过飞行载荷考核,不能作为弹上产品的贮存期结论,只能作为初步的寿命摸底。若试验中未出现故障或未退化,可以进行地面鉴定试验,但无法计算加速因子,也不能给出贮存期评估结论。

针对上述问题,本文在系统总结已有研究成果的基础上,结合多型导弹贮存延寿工程的实践经验,研究提出了“加速因子试验→综合环境剖面加速贮存试验→地面鉴定试验或飞行试验”的试验流程与方法。经过应用表明,该方法提供了一种通过加速贮存试验评估导弹弹上设备贮存期的途径。

1 试验流程与方法

针对导弹弹上设备不仅要满足地面使用载荷要求,还要满足飞行载荷的这一特点,通过加速因子试验获取加速因子计算公式后,根据导弹的贮存使用情况,制定等效地面载荷的综合试验剖面。将试验件按照综合试验剖面等效加速到要求的贮存期目标值后,进行飞行环境载荷考核试验,判断老化到目标年的产品能否满足飞行试验的要求,试验流程如图 1 所示。

具体方法步骤如下:

1) 加速因子试验。采取恒定应力、步退应力、步进应力等加速应力施加方式,获得加速贮存试验数据。根据设备的特性选用合适的加速模型,得出加速因子方程,计算加速因子。

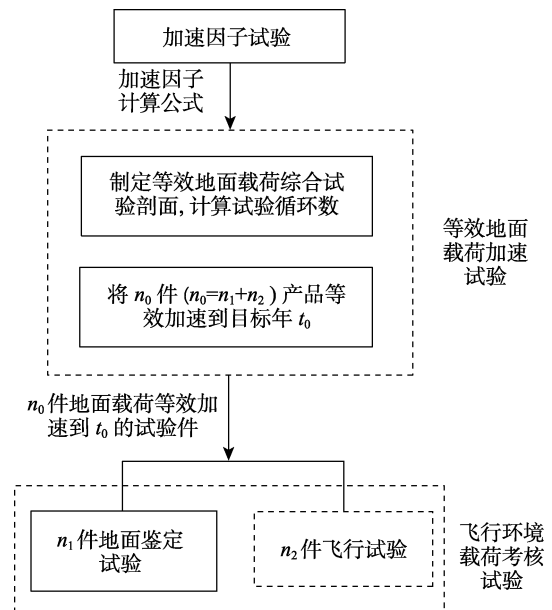


图 1 综合环境剖面加速贮存试验方法流程

Fig.1 Process of the accelerated storage test method based on comprehensive environmental profile

2) 制定综合环境试验剖面,开展加速贮存试验,等效地面环境载荷。根据设备的加速因子制定综合环境试验剖面,基于贮存期目标值和试验件的已有自然贮存时间或加速贮存试验时间,计算加速贮存试验的循环数,将设备的寿命加速到目标值。

(1) 制定综合环境试验剖面。统计设备出厂交付后实际面临的使用环境数据,计算平均 1 a 经受的温度、电、振动等环境载荷值,作为制定综合环境试验剖面 and 计算加速因子的基础数据。

a) 对于温度、湿度等持续作用的环境应力,利用加速因子 a 计算等效 1 a (8 760 h) 的加速贮存试验时间: $t=8\ 760/a$ 。

b) 对于机动运输产生的振动应力,根据每年机动运输的里程,按照 GJB 150.16A《军用装备实验室环境试验方法 第 16 部分: 振动试验》规定的谱形或设备设计技术文件的规定,计算利用振动台模拟要求的机动运输距离所需的振动试验时间。

c) 对于电应力,根据使用过程中通电的实际次数进行通电测试或检查。

根据 a)、b)、c),将设备实际贮存使用 1 a 的环境载荷影响,按照应力施加的顺序,转换为等效 1 a 的试验剖面,即每施加 1 个循环的综合环境试验剖面代表实际贮存使用 1 a。不足 1 a 时,根据已经完成的贮存时间、机动距离和通电次数,计算还需要等效考核的贮存时间、机动距离、通电次数等载荷,按照相似的方法编制相应的综合环境试验剖面。

(2) 等效地面载荷加速贮存试验。根据贮存期目标值和试验件已有自然贮存时间, 计算加速贮存试验的循环次数, 即: 试验循环数 N =贮存期目标值 t_0 -已自然贮存时间 t_1 。试验循环数不是整数时, 一般贮存期目标值 t_0 为整数, 通常是由于试验件的已自然贮存时间 t_1 不是整数引起的。此时可以按照相同的方法制定将试验件等效到满足 1 a 的试验剖面。按照综合环境试验剖面开展加速贮存试验, 并达到试验循环数 N , 等效需要通过加速贮存试验累积的自然贮存使用的载荷。

3) 飞行环境载荷考核试验。选取 n_0 件 ($n_0=n_1+n_2$) 均进行 a) 或均进行 b); 也可以 n_1 件先进行 a), n_2 件再进行 b)。试验成功后, 给出贮存期目标值 t_0 评估结论。对等效加速到贮存期目标年的试验件, 按照设备的设计文件要求开展地面试验, 覆盖导弹飞行所历经的环境载荷。将其装配到导弹上, 参加飞行试验。

将加速因子试验、等效地面贮存试验载荷的综合环境剖面加速贮存试验以及地面鉴定试验或飞行试验相互独立, 分步进行, 能够体现导弹上设备历经的贮存使用环境载荷和飞行环境载荷, 可以用于弹上设备的贮存期评估。

2 案例

某控制器是导弹控制系统的重要设备, 用于接收各控制信号, 进行综合、放大, 输出功率信号驱动伺服机构工作, 贮存期指标要求值为 24 a。该设备在正常使用情况下主要经受温度、运输振动和电应力, 其中, 设置贮存的平均温度为 21 °C, 每年随导弹机动运输 500 km, 通电测试 2 次。通过加速贮存试验对其贮存期进行评估。

1) 通过加速因子试验, 获得某控制器的加速因子计算公式。在 90、100、110、120 °C 条件下开展加速贮存试验, 发现“输出电流”存在退化, 并且该参数也是自然贮存产品中相对退化量最大的参数, 可作为该控制器贮存寿命的表征参数。采用线性退化模型进行回归, 得到不同温度下的退化方程, 利用阿罗尼兹方程计算得到激活能为 0.46 eV。该控制器的贮存期评估加速贮存试验在 100 °C 下进行, 从而计算得到相对于平均温度 21 °C 的加速因子为 48.7, 计算公式为:

$$a = \exp \left[\frac{E}{k_0} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

式中: E 为激活能, 该控制器的激活能为 0.46 eV; k_0 为波尔兹曼常数, $k_0=8.617 \times 10^{-5}$ eV/K; T_s 为加速贮存试验温度, 这里 $T_s=372$ K; T_0 为正常使用温度, $T_0=294$ K。

2) 制定综合环境试验剖面, 开展加速贮存试验,

等效地面环境载荷。选取 2 台已自然贮存 9 年 3 个月的产品用于贮存期评估试验, 自然贮存第 10 年已存放 3 个月, 未通电测试和机动运输。因此, 仍需等效加速到 14 年 9 个月。

对于温度应力, 采取加速的方式进行等效。此时在 100 °C 下, 等效 1 a 的试验时间为 180 h, 等效 9 个月的试验时间为 133 h。对于电应力, 每年测试 2 次, 不进行加速, 按照与实际使用情况完全一致的方式进行测试。对于机动运输 500 km 经受的振动应力, 利用振动台进行模拟, 根据某控制器的设计文件, 其振动试验条件见表 1。从而得到某控制器第 10 年的综合试验剖面如图 3 所示, 第 11~24 年每年的综合试验剖面如图 4 所示。

将上述 2 台某控制器按照图 3 的综合试验剖面开展 1 个循环的试验, 按照图 4 所示的综合试验剖面开展 14 个循环的试验, 共等效 14 年 9 个月的地面使用载荷。若测试仍然合格, 进行下一步; 若试验中出现贮存引起的故障或失效, 则某控制器的贮存期小于 24 a。

3) 开展地面鉴定试验或飞行试验, 考核是否满足导弹飞行载荷。对等效加速到贮存期 24 a 的 2 台某控制器, 其中 1 台按照某控制器的设计文件要求开展地面鉴定试验, 包括低气压试验、高温工作试验、飞行振动试验、飞行冲击试验和加速度试验, 全部通过考核。另 1 台装配到导弹上, 参加飞行试验, 飞行试验也取得成功。

已自然贮存 9 年 3 个月的 2 台某控制器, 等效地面使用环境载荷加速到贮存期 24 a 后, 仍然能够满足导弹飞行要求, 因此可以给出 24 a 贮存期评估结论。

表 1 模拟机动运输振动试验条件

Tab.1 Vibration test condition of simulated mobile transportation

方向	频率范围/Hz	$G_0/(g^2 \cdot Hz^{-1})$	f_0/Hz	总均方根值/g	每方向持续时间/min	试验谱形
X	2~200	0.006 5	40	0.6	12	图 2
Y、Z	2~200	0.015	40	0.9	12	图 2

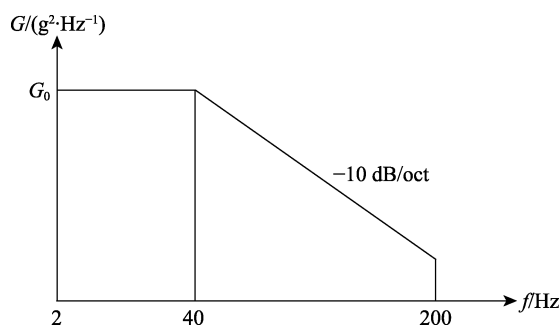


图 2 模拟机动运输随机振动试验功率谱

Fig.2 Power spectral density of random vibration test for simulated mobile transportation

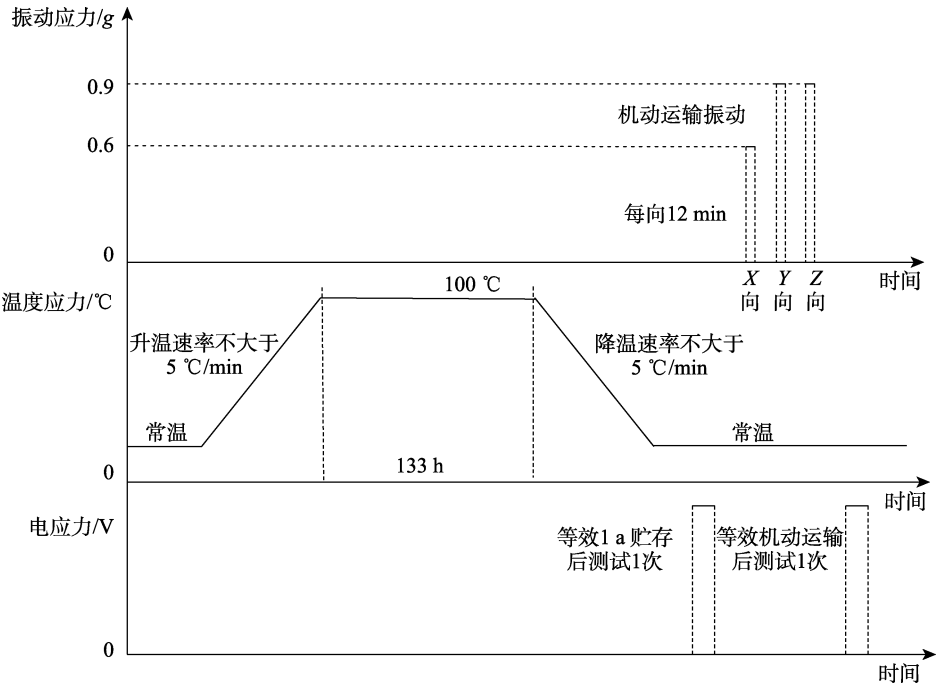


图 3 第 10 年等效 9 个月的综合试验剖面
Fig.3 Comprehensive environmental test profile for nine months in the tenth year

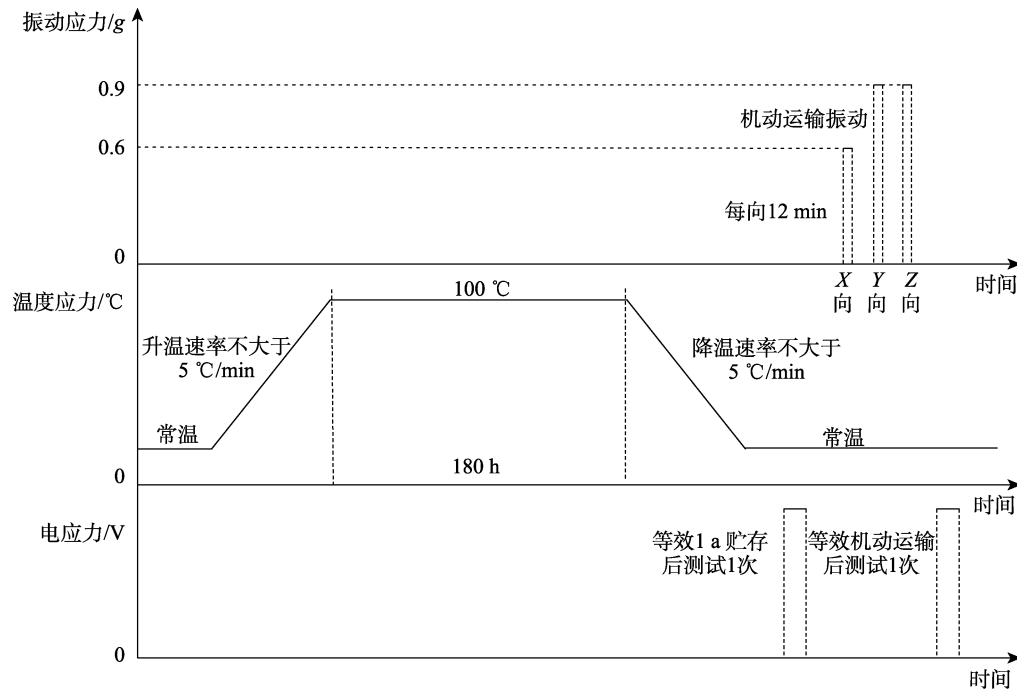


图 4 等效 1 a 的综合试验剖面
Fig.4 Comprehensive environmental test profile for one year

3 结语

本文提出通过加速因子试验获得加速因子计算公式后，制定了综合环境试验剖面，分别开展了导弹弹上设备的地面使用环境载荷累计影响试验与飞行载荷环境考核试验，能够体现导弹弹上设备历经的贮存使用环境载荷和飞行环境载荷，可以用于弹上设备的贮存期评估。该方法在多型导弹贮存延寿工程的弹

上设备贮存期评估中得到应用，表明该方法符合导弹贮存使用的实际情况，可以评估导弹弹上设备的贮存期，具有工程应用价值。

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] 张仕念, 孟涛, 张国彬, 等. 从民兵导弹看性能改进在导弹武器贮存延寿中的作用[J]. 导弹与航天运载技术, 2012(1): 58-61.
- ZHANG Shi-nian, MENG Tao, ZHANG Guo-bin, et al. Effect of Performance Improvement in Guided Missile Weapon Storage Life Prolonging Indicated by Militiaman Missile[J]. Missiles and Space Vehicles, 2012(1): 58-61.
- [3] 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 Hong-yu. Analysis of Missile Storage/Use Environment Based on Fuzzy Theory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(12): 95-100.
- [4] 孟涛, 张仕念. 导弹武器装备贮存延寿评述[J]. 科技研究, 2009, 25(1): 10-13.
- MEN Tao, ZHANG Shi-nian. Review of Missile Weapon Storage Life Extending[J]. Technological Research, 2009, 25(1): 10-13.
- [5] 张仕念, 何敬东, 颜诗源, 等. 导弹贮存延寿的技术途径及关键技术[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 37-41.
- ZHANG Shi-nian, HE Jing-dong, YAN Shi-yuan, et al. Basic Approaches and Key Techniques for Missile Storage Life Extension[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 37-41.
- [6] 李贵杰, 胡鹏, 谢朝阳, 等. 基于力-热双应力加速试验的橡胶减振结构寿命预测研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 25-30.
- LI Gui-jie, HU Peng, XIE Chao-yang, et al. Research on Life Prediction of Rubber Vibration Damping Structure Based on Mechanical-Thermal Double Stress Accelerated Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(12): 25-30.
- [7] 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 Min, ZHAO Quan-cheng, YANG Hua-ming, 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.
- [8] 孔耀, 袁宏杰, 王政, 等. 地面雷达可靠性加速试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(8): 110-114.
- KONG Yao, YUAN Hong-jie, WANG Zheng, et al. Reliability Acceleration Test Method of Ground Radar[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(8): 110-114.
- [9] 杨晓然, 彭小明, 杨小奎, 等. 多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验箱研制[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 27-33.
- YANG Xiao-ran, PENG Xiao-ming, YANG Xiao-kui, et al. Development of Multifactor Integrated Frigid Plateau Climate Simulation and Acceleration Test Chamber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(7): 27-33.
- [10] 赵帅帅, 许玉珍, 陈靖怡, 等. 某型航空包装箱加速试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 34-37.
- ZHAO Shuai-shuai, XU Yu-zhen, CHEN Jing-yi, et al. Accelerated Testing Methods for Certain Aviation Packing Box[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(7): 34-37.
- [11] 孟涛, 张仕念, 易当祥. 导弹贮存延寿技术概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013.
- MENG Tao, ZHANG Shi-nian, YI Dang-xiang. Introduction to Technics for Missile Storage Life Extending[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2013.
- [12] 张鑫, 韩建立, 张崇会, 等. 面向导弹贮存延寿的高加速寿命试验方法[J]. 兵工自动化, 2020, 39(9): 1-4.
- ZHANG Xin, HAN Jian-li, ZHANG Chong-hui, et al. Highly Accelerated Life Test Method for Missile Storage and Life-Extension[J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(9): 1-4.
- [13] 张文广, 贺东旭, 李浩瀚, 等. 机电产品加速贮存试验与寿命评估方法研究[J]. 机电工程, 2021, 38(5): 528-535.
- ZHANG Wen-guang, HE Dong-xu, LI Hao-han, et al. Accelerated Storage Test and Life Evaluation Method of Electromechanical Products[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(5): 528-535.
- [14] NELSON W. Accelerated Life Testing-Step-Stress Models and Data Analyses[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1980, 29(2): 103-108.
- [15] MATIAS R, BARBETTA P A, TRIVEDI K S, et al. Accelerated Degradation Tests Applied to Software Aging Experiments[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(1): 102-114.
- [16] 盖炳良, 滕克难, 王浩伟, 等. 整机级装备贮存延寿试验技术[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(1): 169-174.
- GAI Bing-liang, TENG Ke-nan, WANG Hao-wei, et al. Overview of Storage Life Extension Testing for Assembly Level Equipment[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(1): 169-174.
- [17] 张阳, 杜剑. 石英加速度计贮存延寿试验薄弱环节的辨识[J]. 空间电子技术, 2021, 18(1): 80-86.
- ZHANG Yang, DU Jian. Identification for Weak Links on Storage Life of Quartz Accelerometer[J]. Space Electronic Technology, 2021, 18(1): 80-86.
- [18] 宫晓春, 秦玉灵, 赵薇, 等. 某型金属减振器的加速贮存验证试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 82-87.
- GONG Xiao-chun, QIN Yu-ling, ZHAO Wei, et al. Research on Accelerated Storage Validation Test Method of a Certain Type Metal Damper[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(4): 82-87.
- [19] 范晔, 李晨阳, 陈津虎, 等. 天馈系统产品加速贮存试验与评估研究[J]. 强度与环境, 2020, 47(2): 36-40.

- FAN Ye, LI Chen-yang, CHEN Jin-hu, et al. Research into Accelerated Storage Testing and Evaluation of Antenna Feeder System Equipment[J]. Structure & Environment Engineering, 2020, 47(2): 36-40.
- [20] 张世艳, 刘俊, 黄波, 等. 惯性器件加速贮存环境性能变化规律及失效机理[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 76-80.
- ZHANG Shi-yan, LIU Jun, HUANG Bo, et al. Performance Change Law and Failure Mechanism of Inertial Devices in Accelerated Storage Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 76-80.
- [21] 滕飞, 王浩伟, 滕克难. 面向导弹延寿的冲压发动机加速贮存试验方法[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 37-42.
- TENG Fei, WANG Hao-wei, TENG Ke-nan. Accelerated Storage Test Method of Ramjet for Life Extension of Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 37-42.
- [22] 李沛剑, 王志峰, 郭军刚. 伺服涡轮泵入口密封膜片加速贮存试验研究[J]. 航天制造技术, 2019(2): 45-48.
- LI Pei-jian, WANG Zhi-feng, GUO Jun-gang. Accelerated Storage Test Study of a Sealing Diaphragm Used in Inlet of a Servo Turbo-Pump[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019(2): 45-48.
- [23] 杨志宏, 刘佩风, 马晓东, 等. 某天线加速贮存试验与寿命评估方法研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(3): 98-102.
- YANG Zhi-hong, LIU Pei-feng, MA Xiao-dong, et al. Accelerated Storage Testing and Life Assessment Method of Antenna[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(3): 98-102.
- [24] 席运洋, 刘万远, 鲍华. 某型空空导弹电子部件加速贮存寿命试验方法研究[J]. 航空兵器, 2016, 23(1): 64-68.
- XI Yun-yang, LIU Wan-yuan, BAO Hua. Testing Method Study of Accelerated Storage Life for Electronic Components in Certain Air-to-Air Missile[J]. Aero Weaponry, 2016, 23(1): 64-68.
- [25] 赵永兴. 开关电源加速贮存寿命方法研究[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(1): 128-132.
- ZHAO Yong-xing. The Accelerated Storage Life Method of Switch Power Supply[J]. Computer & Digital Engineering, 2015, 43(1): 128-132.

责任编辑: 刘世忠