

doi: 10.7690/bgzdh.2020.09.001

面向导弹贮存延寿的高加速寿命试验方法

张鑫^{1,2}, 韩建立¹, 张崇会², 郭聚¹

(1. 海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 91614 部队, 辽宁 大连 116044)

摘要: 为保持导弹作战效能及可靠性, 设计一种贮存延寿的高加速寿命试验方法。依据可靠性理论, 基于高加速寿命试验 (highly accelerated life test, HALT) 的原理和特点, 阐述了高加速寿命试验在导弹贮存延寿试验中的应用价值, 通过对 HALT 流程、试验剖面、试验方法的分析, 设计 HALT 方案, 给出在多种应力作用下获取故障模式及确定产品工作极限的方法。实验结果表明, 该方法为提高加速试验效率提供了参考依据。

关键词: 贮存延寿; 高加速寿命试验; 试验方法; 弹载电子设备

中图分类号: TJ765.4⁺2 **文献标志码:** A

Highly Accelerated Life Test Method for Missile Storage and Life-extension

Zhang Xin^{1,2}, Han Jianli¹, Zhang Chonghui², Guo Ju¹

(1. College of Shore Defense, Navy Aviation University, Yantai 264001, China;

2. No. 91614 Unit of PLA, Dalian 116044, China)

Abstract: In order to maintain the operational efficiency and reliability of the missile, designed a high accelerated life test method for missile storage and life-extension. On the basis of reliability theory, based on the principle and characteristics of high accelerated life tests, this paper expounds the high accelerated life test in the application of missile storage life extension test value, through analysis of HALT process, test section and test method, designed the HALT program and gave the failure mode under varied stress and methods for ascertaining product work limit. The experimental results show that this method provides the reference for improving the efficiency of accelerated test.

Keywords: storage life-extension; highly accelerated life test (HALT); test method; missile-borne electronic equipment

0 引言

对于导弹类装备而言, “长期贮存、一次使用”是其普遍特点^[1-2], 同时导弹又是一种造价昂贵、制造精密的装备。在目前的军事背景下, 导弹长期贮存在服役周期中占有很大的比例。当导弹临近预定的贮存期时, 考虑到经济成本等方面, 需要采取一定技术延长其贮存期。国内外一直很重视开展贮存延寿工作, 以提高导弹作战效能, 达到节省开支的目的。

我国开展导弹贮存延寿方法的起点较晚, 但是发展迅速, 其中王浩伟等^[3]将导弹贮存延寿试验划分为自然贮存试验、延寿试验、加速贮存试验和验证性试验 4 个部分, 并确定加速贮存试验为其中的关键和核心。随着电子工业和材料工业的飞速发展, 导弹各系统的可靠度越来越高, 导致利用传统的加速寿命试验方法试验难度增大, 周期变长, 费用增加; 因此, 能够以较高的激发效率快速暴露产品的设计缺陷和潜在故障模式、缩短试验时间的高加速寿命试验受到人们的广泛关注。

1 导弹贮存延寿试验的意义和内容

导弹在作战使用或者退役报废前一般要经历库房贮存、装卸转运和战备值班 3 种状态。这 3 种状态持续的时间总和即导弹贮存期, 是在导弹发展论证、定型生产前已经确定的指标^[3]。当到达贮存期限后, 为了保证导弹在可能发生作战环境下的使用可靠性, 应停止使用, 但考虑到导弹制造成本和战备需求, 在可靠性理论指导下, 对导弹贮存的薄弱环节采取延寿措施, 恢复装备状态, 保持战术性能, 延长贮存期限, 即通常意义上的导弹贮存延寿。

在制定延寿措施之前, 要确定导弹的贮存延寿目标, 明确导弹贮存的失效模式与失效机理以及可靠性中的薄弱环节, 需要通过导弹贮存延寿试验来实现。在导弹贮存延寿工作中, 首先, 收集导弹服役过程中的自然贮存数据, 通过贮存可靠性预测, 拟定可能的延长期限; 其次, 选取典型部件开展失效机理分析, 确定部件的薄弱环节, 为加速实验对象的选择提供支持; 然后, 根据导弹服役任务剖面, 设计加速贮存试验, 对延寿样品进行加速贮存, 获

收稿日期: 2020-05-19; 修回日期: 2020-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(51605487)

作者简介: 张鑫(1993—), 男, 山东人, 硕士, 助理工程师, 从事海军导弹装备综合保障研究。E-mail: 614041515@qq.com。

得在加速试验条件下的等效周期；最后，提出导弹延寿维修措施，开展维修工作。

2 HALT 在导弹贮存延寿试验的应用

目前，导弹贮存延寿试验还存在很多难点，尤其是引进导弹仍然大量服役，我国没完全掌握这类装备潜在设计缺陷、失效模式与失效机理，对其进行导弹贮存延寿试验具有更大的困难和挑战；此外，随着服役年限增加，延寿工作对缩短试验时间、降低试验成本的需求更加迫切，而传统的加速寿命试验并未完全掌握产品的工作极限和破坏极限，在试验应力选择中过于保守，无法满足缩短试验时间的要求；因此，笔者基于 HALT 的原理和特点，提出在导弹贮存延寿试验中，通过对产品器件进行高加

速寿命试验，在不改变试验件失效机理的前提下，最大程度提高加速寿命试验应力水平，进而达到缩短试验周期的目的。

受限于国内导弹贮存延寿技术的发展水平，目前导弹贮存延寿试验仍然以材料级、元器件级和部件级为主，整机级和整弹级理论尚不成熟^[4-5]；因此，面向导弹贮存延寿试验的高加速寿命试验仍以材料级、元器件级和部件级对象为主。

3 高加速寿命试验实施方法

3.1 HALT 基本流程

目前国内对高加速寿命试验的应用，主要集中在电子和机电产品方面^[6-7]，基本流程如图 1 所示。

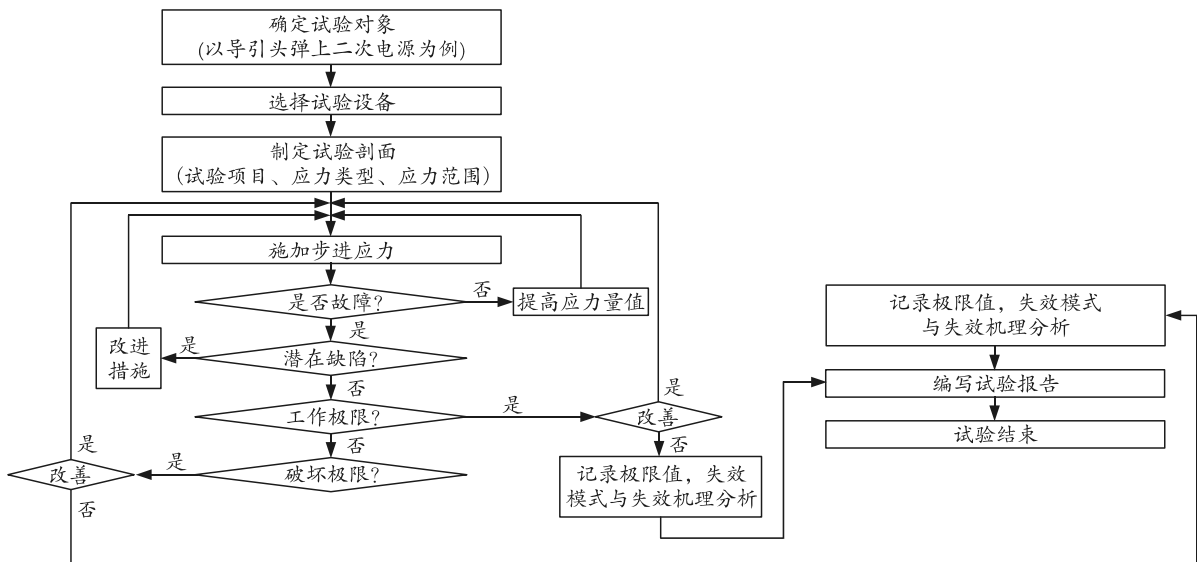


图 1 HALT 基本试验流程

3.2 试验剖面应力设计

根据美国科学家 Gregg K. Hobbs 确定的理论，HALT 中常采用步进应力的方法，逐渐增加应力值，直到寻找到产品的工作极限和破坏极限。常见应力的建议步长如表 1^[8]。

表 1 HALT 常见应力建议步长

应力	建议步长	应力	建议步长
全轴向	GRMS 量值的 25%	电源线性	每种电源
冲击振动	10	循环次数	20
温度/℃	10	电源线性频率	预期裕度的 20%
温度变化率	可获得的最大速率	湿度	10%
电压	预期裕度的 20%	其他合适的应力	预期裕度的 20%

根据 HALT 不同的试验目的，设计不同范围的应力值，每种应力范围的限度概念见文献[9]。应力值范围设计的原则如图 2。

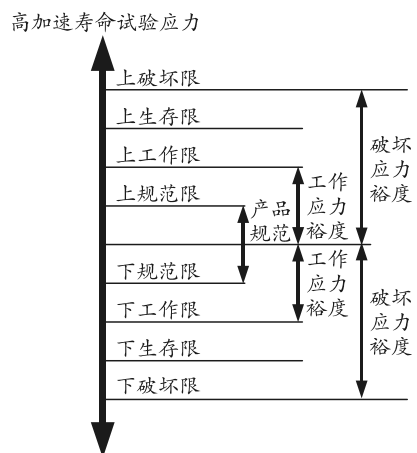


图 2 HALT 试验剖面应力范围

在实施 HALT 的过程中，为保证试验结果的可信度，避免试验件过早失效，应力施加顺序应遵循先进行破坏性小的应力试验，再进行破坏性大的应

力试验的原则。以电子产品为例,按照高加速寿命试验中常用的应力(温度应力、温度变化率、振动应力和综合环境应力)排序,设计 HALT 试验剖面为低温步进应力试验、高温步进应力试验、快速温变试验、振动应力试验和综合环境试验^[10]。

当试验过程中产品发生故障时,步进应力停止增加,并根据应力类型确定的步长为标准,将试验应力返回步长的一半甚至更小的应力,待稳定一段时间后对故障试验件进行重新测试,如:产品正常工作,则该测量值为试验件的工作极限;将施加的应力降至正常应力范围,试验件仍然不能恢复功能,则该量值为试验件破坏极限。

4 典型弹载电子设备 HALT 方案

4.1 方案背景分析

在某型导弹弹载电子设备中,导引头对于导弹整体战技性能影响重大,属于导弹的关键部件,也是制约导弹贮存期的关键。以导引头弹载二次电源为例,该部件在结构上包括大量的金属、非金属材料 and 电子元器件,是典型的机电一体设备。此类设备比较适合于 HALT 的应用,且结构复杂、价格昂贵,受实验周期、成本和预测价值的限制,对注重激发效率的 HALT 有需求。在导弹贮存延寿工程实际中,常采用加速贮存试验为主流方式;因此,实施 HALT 有较大的应用价值,可以快速确定设备的环境应力极限,从而为设计高效的试验应力提供数据支撑。

导弹制造成本高昂,一般而言,可供实验的装备只有 1、2 枚,属于典型的小子样条件;因此,在试验件选取中,需假定选取的试验件能够代表装备整体的可靠性,由产品质量差异造成的个别产品提前故障等非试验方法因素,由装备的验收质检环节来保证。

结合该型导弹的作战使用背景,自研制生产到报废需经过装卸转运、洞库贮存、维护保养、状态测试、战备值班等诸多事件,所处的环境条件复杂多样,通常包含湿热、冲击、霉菌、磁场、电压等复杂环境因素^[11]。文献[12-13]给出了电子产品的失效机理主要是产品在高温下的性能退化和损坏,另外还需考虑值班环境下舰艇摇摆对导弹的冲击,以及海上环境温度变化导致器件由不同材料膨胀系数而引起的产品性能变化;因此,在以导引头二次电源为典型弹载电子设备,加速贮存寿命试验中需要考虑温度应力、振动应力和快速温变应力^[14]。

4.2 试验方案项目

为保证产品失效模式和失效机理不变,只需要获取导引头二次电源在实际使用中所受主要应力作用的工作极限,为实施加速贮存寿命试验的应力设计提供参考依据。考虑到样本小子样条件,应合理确定应力范围,试验中尽量避免试验件破坏失效,结合试验目的和实验背景条件针对性设计 HALT 方案。

4.2.1 低温步进试验级

试验剖面设计:将室温降至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (为产品经历自然环境温度中的较低值),按照表 1 中建议步长确定为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,温变速率为试验台最大温变速率,步阶时间定为 10 min ,在每一步阶温度稳定时测试试验件性能是否正常,按 3.2 节的方法找到试验件低温工作极限。试验剖面应力如图 3 所示。

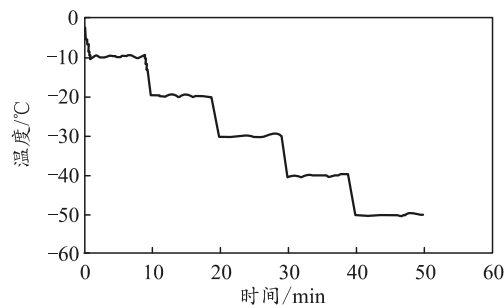


图 3 低温步进试验剖面应力施加方式

实验结果可以确定试验件低温工作极限,为加速贮存实验中进行低温冷冻试验确定更高的低温试验应力提供依据;通过试验过程中测试试验件在低温下性能退化特性,快速发现试验件潜在失效模式。

4.2.2 高温步进试验

试验剖面设计:将室温升至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (为产品经历自然环境温度中的较高值),按照建议步长确定步长为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,温变速率为试验台最大温变速率,步阶时间定为 10 min ,在每步阶温度稳定时,测试试验件性能是否正常,找到试验件高温工作极限。试验剖面应力如图 4 所示。

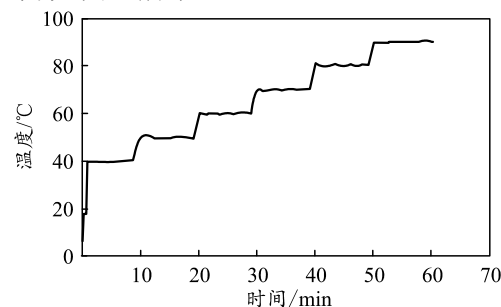


图 4 高温步进试验剖面应力施加方式

实验结果可以确定试验件高温工作极限，为进行高温老化试验确定更高的试验应力提供依据。通过试验过程中测试件在高温下性能退化特性，快速发现试验件潜在失效模式。

4.2.3 快速温度变化试验

试验剖面设计：在前 2 个试验的基础上设计快速温度变化试验，按照美国科学家 Gregg K.Hobbs 给出的建议，快速温度变化试验中，高低温的端点值一般取工作极限温度的 80%，温变速率为实验台最大温变速率，步阶保持时间为 10 min。为保证试验件不破坏失效，在参考相似类型器件相似产品的高加速寿命试验设计基础上，根据文献[15]中对微波组件产品的高加速寿命实验结果，往复进行 5 个循环后器件未破坏失效，可设定试验中温度变化循环 5 次，在每一步阶温度稳定时，测试试验件性能是否正常。试验剖面应力如图 5 所示。

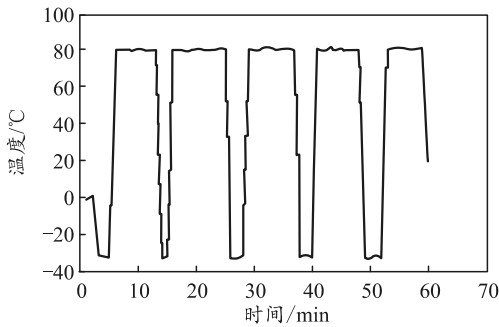


图 5 快速温度变化试验剖面应力施加方式

实验结果可以确定检测试验件抗剧烈温度变化的能力，为模拟温度变化进行高低温交变加速试验确定更高的试验应力提供依据。

4.2.4 振动步进试验

试验剖面设计：初始应力设定为 5 Grms，按照建议步长设定每步为 5 Grms，步阶保持时间为 10 min，在每一步阶稳定时，测试试验件性能是否正常。试验剖面应力如图 6 所示。

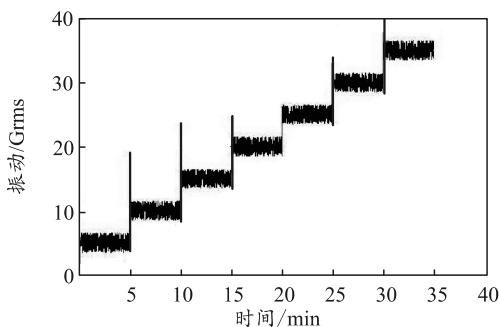


图 6 振动步进试验剖面应力施加方式

实验结果可以确定试验件在振动应力下的工作

极限，为模拟设备在舰船振动环境的加速寿命试验应力水平确定提供依据。

4.2.5 综合环境应力试验

试验剖面设计：产品在多环境应力同时作用下更容易失效，为避免试验过程中试验件破坏失效，同时施加温度和振动应力应该留有一定裕度，温度应力施加方式按照快速温变试验的方式施加；考虑真实环境中的振动应力以随机振动为主，振动应力值取振动工作极限应力的 80%左右，伴随温度应力开始施加，并在温度循环结束后恢复初始振动应力，测试试验件是否失效。为观察 2 种应力施加方式，试验剖面应力分别如图 7 所示。

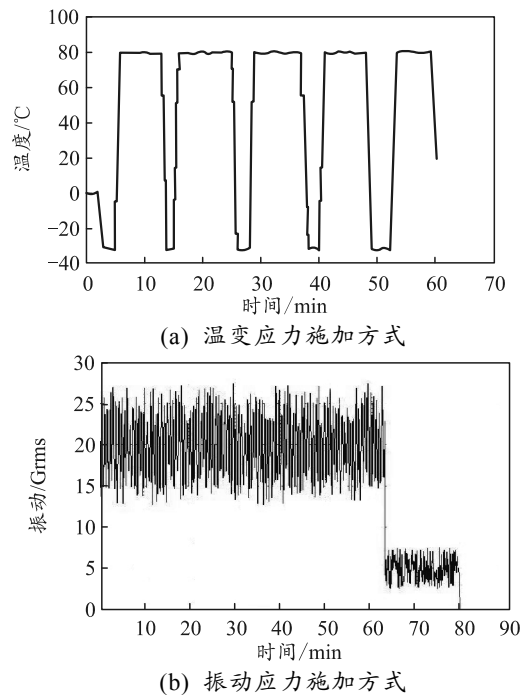


图 7 综合环境试验剖面振动应力施加方式

实验结果可以评估试验件抗综合环境应力的能力，激发由温度、温变和振动等应力综合引起的潜在故障，为进行多应力条件下的加速试验提供参考依据。

5 总结与展望

笔者通过对导弹贮存延寿试验的分析，针对某型导弹典型弹载电子设备，结合其任务环境和加速试验需求，给出了试验件在多种应力作用下获取工作极限并发现潜在故障模式的方法，为导弹贮存延寿试验中开展产品失效模式与失效机理分析、采取提高试验应力的方法提高加速试验效率提供了参考依据。

连接器，通过整机背面一个凹台安装，整机背面的右侧是设备的电源输入接口，依次是以太网口、SRIO 接口、USB 接口等。当不使用时，可用金属防尘盖塞将接口盖住，满足屏蔽及防水要求。



图 3 多接口加固笔记本后面设计

3 结束语

笔者设计的产品已应用于各种苛刻恶劣环境条件下，既保持了加固笔记本便携、耐摔、防水、防撞的特点，又满足一机多用，节约空间及成本。应用结果表明：该加固笔记本性能高、接口丰富，可

(上接第 4 页)

当前，国内 HALT 试验层次限于材料级、元器件级和部件级，整机级、整弹级的高加速寿命试验理论与方法将是今后研究的重点。此外，国内的高加速寿命试验还局限于试验方法研究，尚缺乏模型支持，构建基于失效模式与失效机理分析的高加速寿命试验模型是设计有效高加速寿命试验方法的核心和关键。

参考文献：

[1] 李久祥, 申军, 侯海梅, 等. 装备贮存延寿技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007: 1.

[2] 孟涛, 张仕念, 易当祥, 等. 导弹贮存延寿技术概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013: 212-215.

[3] 王浩伟, 滕克难, 吕卫民. 导弹贮存延寿试验关键技术及研究进展[J]. 飞航导弹, 2019, 31(1): 55-65.

[4] SABBAH W, ARABI F, AVINO S O, et al. Lifetime of power electronics interconnections in accelerated test conditions: High temperature storage and thermal cycling[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 16(10): 76-77, 444-449.

[5] 张生鹏, 李宏民, 赵朋飞. 导弹装备贮存寿命加速试验技术体系探讨[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2):

以在多种条件下进行多功能工作，是室外作业、车载操作、潮湿环境下不可多得的工具。

参考文献：

[1] 袁强, 亲友伦. 一种军用加固笔记本电磁兼容设计方法[J]. 安全与电磁兼容, 2018, 155(6): 68-70.

[2] 魏永辉, 郝宾波, 李莉芳. 计算机技术的应用现状与发展趋势[J]. 科学技术创新, 2017(12): 170-170.

[3] 孙科星, 刘治红. 基于以太网的 FANUC 数控机床 DNC 系统开发[J]. 兵工自动化, 2019, 38(12): 20-23.

[4] 王明渝, 俞静. 电池组均衡充电电路研究[J]. 电气应用, 2007, 26(8): 46-47.

[5] 朱光辉, 侯振义. 一种铅酸蓄电池脉冲修复充电电路研究[J]. 电源技术, 2011, 35(9): 1090-1094.

[6] 李军徽, 朱星旭, 严干贵. 模块化 VRB-EC 混合储能系统配置与控制的优化[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 67-71.

[7] 葛亚明, 李军. 锂离子电池模型参数辨识方法和放电模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(6): 188-191.

92-96.

[6] 翁雷, 刘庆民, 张树文. 军用电子产品的高加速寿命试验[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(1): 29-32.

[7] 黄英华. 提高电子产品可靠性的方法: HALT/HASS[J]. 标准与技术追踪, 2004(11): 32(11): 124-131.

[8] HOBBS G K. 高加速寿命试验与高加速应力筛选[M]. 北京: 航空工业出版社, 2012: 6.

[9] 郭秀才, 冯伟泉, 郑会明. 卫星电子组件高加速寿命试验技术[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(5): 454-458.

[10] 褚卫华, 陈循, 陶俊勇. 高加速寿命试验(HALT)与高加速应力筛选(HASS)[J]. 强度与环境, 2002, 29(4): 57-62.

[11] 高松, 滕克难, 赵建印, 等. 温湿度因子对舰载导弹发射箱可靠性的影响分析[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(1): 101-105.

[12] 邹宁彪. 温度、湿度应力在电气电子产品失效中的作用[J]. 印制电路信息, 2005(2): 14-20.

[13] 李贤灵, 李高生. 某航空电子设备的 HALT 方案设计与实施[J]. 装备环境工程, 2016, 14(4): 117-123.

[14] 李敏伟, 傅耘, 王丽, 等. 加速贮存寿命试验设计方法研究[J]. 装备环境工程, 2014, 2(4): 58-64.

[15] 晋李华, 刘中华. 微波组件产品高加速寿命试验综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 6(35): 69-73.