

导弹装备贮存寿命加速试验技术体系探讨

张生鹏, 李宏民, 赵鹏飞

(航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

摘要: 针对导弹装备的特点, 提出从应力类型、产品类别及产品层次三个维度开展贮存寿命加速试验技术研究, 探讨了导弹装备的贮存寿命加速试验技术体系, 提出在其全寿命周期应开展的贮存寿命加速试验工作项目, 以进一步规范和指导导弹装备贮存寿命加速试验工作的开展, 为导弹装备贮存寿命指标的验证及评估提供有力保障。

关键词: 导弹装备; 贮存寿命; 加速试验; 技术体系

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.02.018

中图分类号: TJ760.89

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)02-0092-05

Accelerated Testing Technology System for Storage Life of Missile Equipment

ZHANG Sheng-peng, LI Hong-min, ZHAO Peng-fei

(Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R&T Center, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: Aiming at characteristics of missile equipment, research on accelerated test technology of storage life from three dimensions of stress type, product category and product level was proposed in this paper. In order to standardize the storage life of missile equipment, accelerate the test work, and guarantee verification and assessment for storage life index of missile material, an accelerated testing technology system for storage life of missile equipments was established.

KEY WORDS: missile equipment; storage life; accelerated testing; technology system

导弹装备具有“长期贮存, 一次使用”的特点, 在导弹产品全寿命周期内, 绝大部分的时间是处于贮存或不工作状态。目前各型号研制中, 都将导弹贮存若干年后的可靠度作为导弹的一项重要指标。对于如何开展导弹贮存寿命指标的考核与验证, 目前还缺乏有效的标准和规范作为依据。如果通过长期的自然贮存来验证导弹的贮存期, 对于军方要求武器型号在定型时能给出贮存期结论显然是不现实的。因此, 开展导弹加速贮存试验技术研究是适应当前型号研制周期短、经费少、可靠性要求高的形势需要。

导弹装备的研制是一个系统工程, 要全面实现并满足贮存可靠性指标要求, 需要在研制过程中及早制定试验计划, 分阶段、针对不同级别和层次的产品系统地开展贮存寿命加速试验验证工作。目前在 GJB 450A《装备可靠性工作通用要求》^[1]及 GJB 4239《装备环境工程

管理》^[2]中, 已经建立了比较完善的可靠性试验及环境试验技术体系。对于寿命试验, 还缺乏相应的标准体系框架。文中针对导弹产品的特点, 结合国内外贮存寿命加速试验技术研究现状^[3-4], 探讨开展导弹装备贮存寿命加速试验技术研究的维度、试验时机及总体技术途径, 提出在其全寿命周期应开展贮存寿命加速试验的工作项目, 为快速验证及评估新研装备的贮存寿命, 以及评定现役装备的剩余寿命提供依据。

1 导弹装备贮存寿命加速试验技术要点

1.1 技术特征

目前, 国内掀起了导弹加速贮存试验与评估技术研

究热潮，但技术难度大，主要体现在以下几个方面^[4]。

1) 结构复杂，可能失效的环节多。导弹装备结构复杂，是由不同种类原材料、元器件、多层产品构成的复杂体系。体系中不管是材料器件的问题、工艺的问题、设计的问题，还是使用的问题等，最终都会在贮存使用过程中暴露出来。

2) 环境剖面复杂。导弹装备在贮存寿命内经历的环境剖面包括工作状态和非工作状态，且交替出现。在长期贮存过程中，受到温度、湿度等因素的影响，随着贮存年限的增加，会发生材料老化、腐蚀，元器件、含能材料、磁性结构的性能衰退等物理或化学变化。在“地面使用”过程中受振动、冲击、电应力等因素的影响会产生疲劳、磨损、过应力等物理损伤。

3) 失效原因、过程复杂。尽管贮存延寿主要研究非工作状态下的寿命问题，但在导弹的贮存剖面内，由于长期贮存和“地面使用”交替出现，导致难以辨别导弹产品发生失效的原因和过程，增加了研究的难度。

4) 失效模式多，失效判据制定难。导弹装备的失效模式很多，部分失效模式之间还具有相关性，单一失效模式的失效数据又很少，这些都给制定科学有效的失效判据带来了困难。目前国内普遍缺少用于表征贮存寿命的性能参数指标体系及其判据，成为制约贮存延寿工作的瓶颈问题。

5) 老化过程监测检测难。贮存寿命加速试验主要研究产品的老化问题，最直接、最有效的方法是对老化过程进行监测。由于老化速度非常缓慢，监测的时间很长，对检测设备的灵敏度和可靠性要求高，特别是对传感器的要求很高。

因此，贮存寿命加速试验不仅仅是寿命问题，还包含了对导弹研制的再认识。贮存延寿技术涉及损伤力学、失效化学、失效物理、材料学、航空航天技术、环境工程、统计学、失效分析学等众多学科领域，专业面广，对国家的工业基础依赖很强，是一项基础性、长远性、全局性的研究课题。

1.2 技术研究维度

针对导弹装备贮存寿命研究的这些特点，文中提出从应力类型、产品类别及产品层次三个维度开展贮存寿命加速试验技术的研究，如图 1 所示。

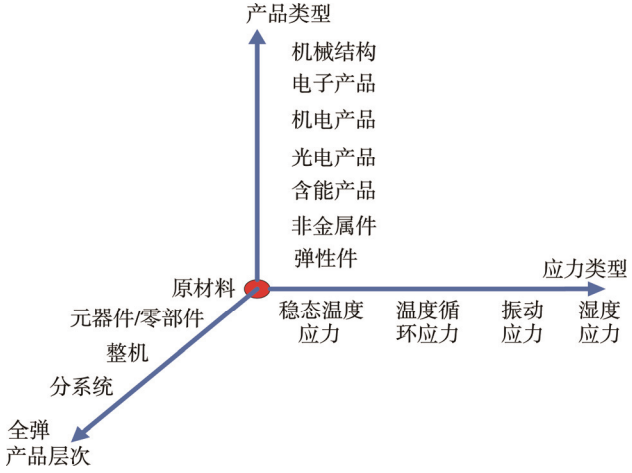


图 1 导弹加速贮存试验三维体系

1.2.1 产品层次

从产品层次划分，导弹从上至下可分为系统级、分系统级、整机级和元器件材料级^[5]，如图 2 所示。针对不同层次的产品，贮存寿命加速试验的目的和方法不同。

1.2.2 产品类别

按照产品类别，将导弹产品分为电子产品、机电产品、光电产品、结构件、弹性元件、含能产品（火工品，发动机）等，如图 3 所示。不同类别产品的寿命特征参数及其检测方法不同：对于结构件、光学产品、电路板等，主要采用无损检测的方法；对于电子产品（包括软件），需要采用电参数测试及数学统计分析相结合的方法进行评价；对于机电产品，需要进行电参数测试及负载测试；对于含能产品，则需要通过点火等方式进行测试。

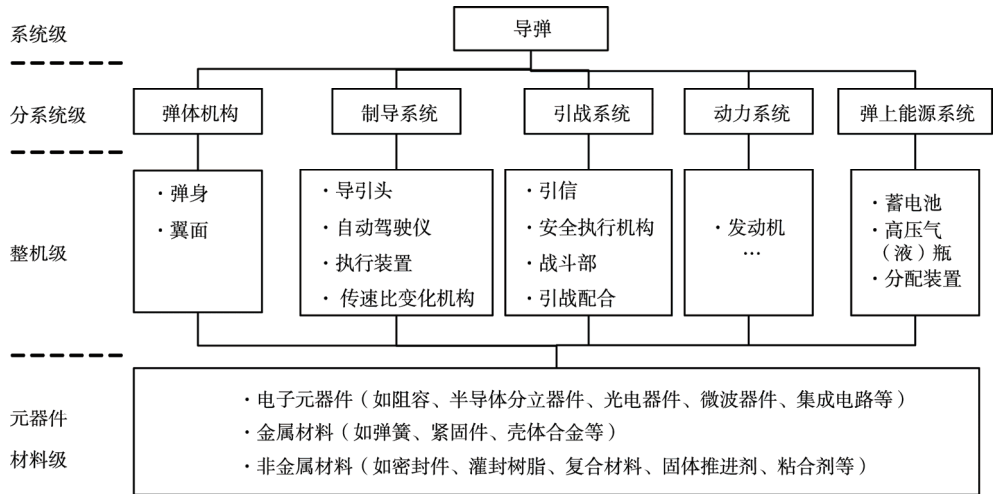


图 2 导弹产品分级结构

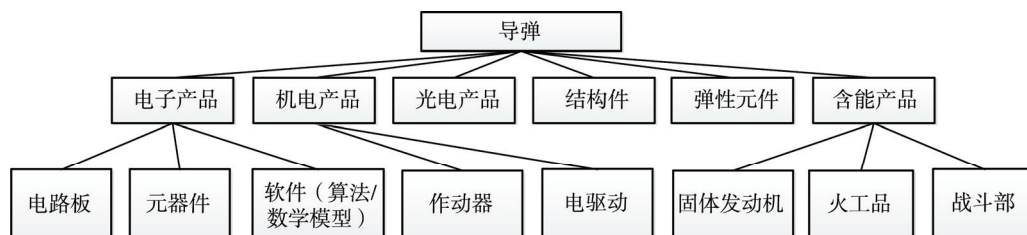


图3 导弹产品类别

1.2.3 应力类型

根据导弹装备实际贮存任务剖面、包装状态下的敏感环境应力选取相应的加速模型，如图4所示。

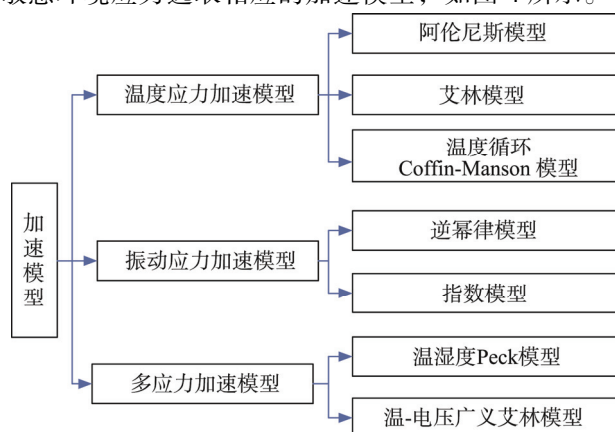


图4 贮存寿命加速模型

1.3 试验时机

根据研制各阶段的贮存试验任务及可能提供的

试验产品情况，在研制过程中及早制定试验计划，分阶段、针对不同级别和层次的产品系统地开展贮存寿命加速试验验证工作。一般按以下方法选取。

1) 方案阶段及初样阶段：可选取采用的新材料、新元器件/零部件以及影响导弹贮存寿命的薄弱部件作为试品。薄弱环节的贮存寿命加速试验结果是开展弹上设备和分系统加速试验的基础和前提。

2) 试样阶段：选取关键的弹上设备作为试品。

3) 定型阶段：选取关键的弹上设备、分系统/全弹作为试品。

此外，在装备交付使用阶段，也可开展不同级别和层次产品的贮存寿命加速试验，用于评定产品的剩余寿命。

1.4 技术途径

为了验证和评价导弹装备的贮存寿命指标是否满足研制总要求或任务书的要求，以导弹装备的产品层次为主线，建立从薄弱部件、整机到分系统/全弹的整体的加速寿命试验总体技术方案，如图5所示。

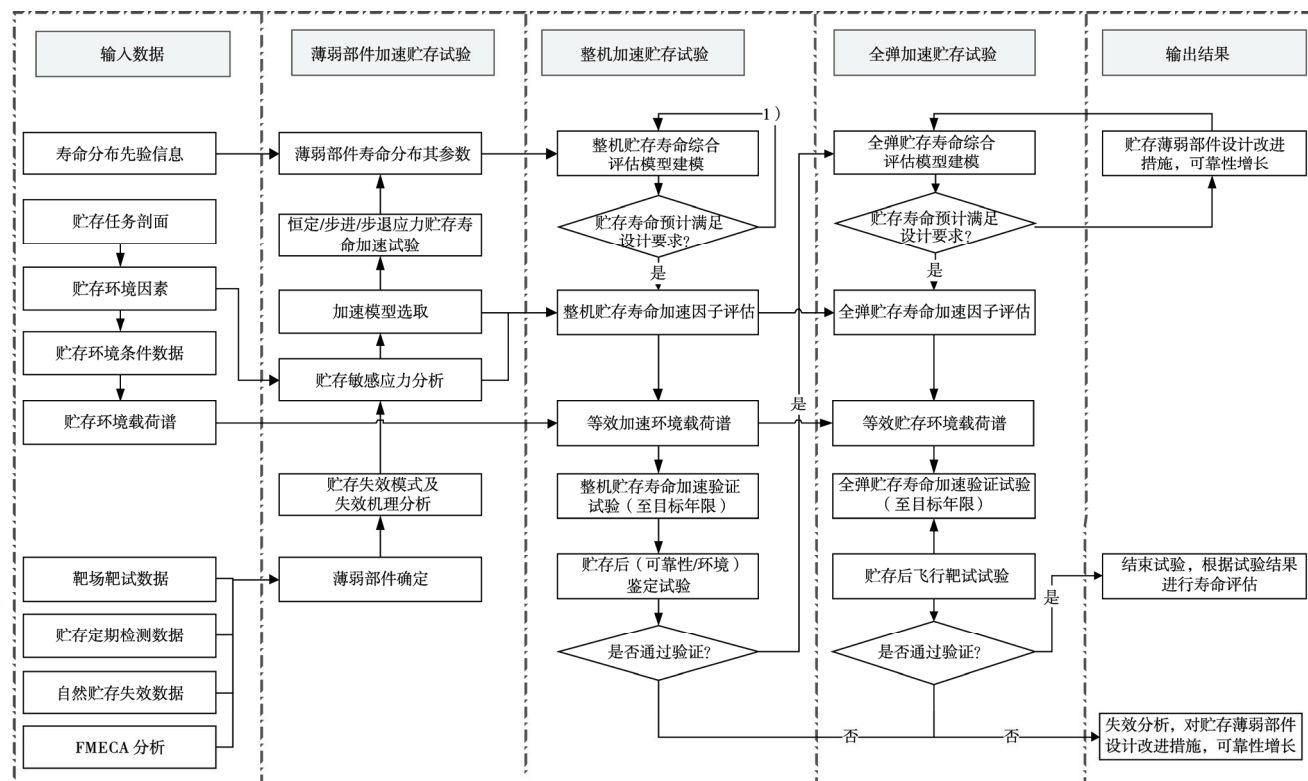


图5 导弹贮存寿命加速试验总体技术方案

该方案中, 导弹贮存寿命加速试验输入的数据包括: 导弹全寿命周期贮存环境条件数据; 贮存失效数据, 包括靶场靶试数据、贮存定期检测数据, 自然贮存失效数据及贮存可靠性分析数据。

开展薄弱部件加速贮存试验的目的是确定各环节的寿命分布模型及加速模型, 其结果是开展弹上设备、分系统/全弹加速试验的基础和前提。弹上薄弱环节产品可采用恒定应力或者步进/步退应力加速试验方案^[6-7]。

对于弹上设备等整机级产品只开展验证性试验, 其目的是根据底层材料、器件、部组件的寿命信息和加速试验结果, 建立整机产品贮存寿命模型, 求取整机加速因子, 通过加速试验剖面在较短的时间考核验证产品的贮存寿命。整机级产品采用贮存寿命加速验证试验与贮存后可用性验证试验相结合的试验方案^[8-9]。

分系统/全弹加速贮存试验也是验证性试验, 因为依靠常规不同类型的加速试验方法, 试验件数量满足不了要求, 成本太高。分系统/全弹加速贮存试验需要依托构成导弹的底层材料、器件、部组件、整机的寿命信息和加速试验成果, 自上而下、系统集成、形成加速试验验证方法。分系统/全弹采用贮存寿命加速验证试验与贮存后飞行靶试相结合的试验方案^[4]。

2 导弹装备贮存寿命加速试验工作项目探讨

2.1 贮存环境数据归纳

通过分析导弹贮存任务剖面, 进行贮存环境条件分析, 确定产品失效或退化敏感应力。

导弹全寿命周期贮存环境条件数据, 需要与实际贮存环境或研制总要求/任务书对应。

贮存环境载荷谱是进行导弹贮存可靠性(寿命)设计、分析的基础和输入, 同时, 实际贮存状态的环境载荷谱也是进行导弹贮存可靠性和贮存寿命试验验证和评估的依据, 提供了加速贮存试验的基准。

2.2 贮存失效信息分析

收集导弹装备贮存失效模式及失效机理数据, 为确定贮存寿命薄弱环节提供依据。

1) 调研分析收集的战备值班、演习靶场、靶试等外场数据, 调研在演习、靶试时导弹装备上工作不正常、性能退化及失效的组件。

2) 调研分析导弹装备的定期检测数据, 从中分析出导弹装备性能参数的退化趋势。有明显单调退化趋势的产品通常可以确定为导弹装备的贮存薄弱元器件及组件。

3) 重点关注采用新材料、新器件、新工艺的产

品。在材料与器件寿命分析的基础上, 找出导弹装备与筒(箱)弹的贮存可靠性薄弱元器件及组件。

4) 通过可靠性预计, 估计导弹故障率较高的环节和产品。通过 FMEA 以及 P-FMEA 确定导弹设计上的薄弱元器件及组件以及这些薄弱元器件及组件的敏感应力。

2.3 薄弱部件加速试验

弹上薄弱环节产品贮存寿命加速试验的目的是确定其寿命分布模型和加速模型类型及其参数, 其结果是开展弹上设备、分系统/全弹加速试验的基础和前提。

1) 弹上薄弱环节产品, 包括材料件、元器件及部组件可采用恒定应力或者步进/步退应力加速试验方案。

2) 薄弱元器件及组件贮存失效模式分析应考虑导致贮存失效的各种影响因素, 包括产品的物理及力学性能、贮存环境条件、环境防护措施及安装方式等, 通过失效机理分析确定导致薄弱元器件及组件失效的物理化学过程及失效敏感应力, 为加速模型的选择提供依据。

2.4 整机加速试验

整机加速试验的目的是根据底层材料、器件、部组件的寿命信息和加速试验结果, 建立产品在实验室加速试验状态下的失效与自然贮存失效的等效关系, 通过加速试验在较短的时间验证和评价产品的贮存寿命是否满足规定的指标要求。

1) 整机加速贮存试验是验证性试验。整机采用贮存寿命加速验证试验与贮存后可用性验证相结合的试验方案。

2) 固体火箭发动机, 战斗部及火工品等采用 GJB 1307A—2004《航天火工装置通用规范》^[10]推荐的加速老化试验与贮存后环境及性能试验相结合的试验方案。

3) 整机加速通过加速因子进行时间折算, 根据整机加速因子、实际贮存环境, 设计贮存寿命加速试验剖面, 并开展试验验证。因此根据材料、器件级的加速试验数据求取整机加速因子是关键。

2.5 分系统/全弹加速试验与评估

以产品贮存薄弱环节与寿命短板分析为基础, 实际贮存环境载荷谱与载荷谱编制为基准, 底层产品(材料、元器件、部组件等)和整机(电子类、机电类、光电类和结构类)加速试验信息为支撑, 采用金字塔式建模方式, 建立贮存条件下分系统/全弹的贮存寿命模型, 开展贮存期加速试验验证与评估。

1) 分系统/全弹加速贮存试验是集成性试验。需

要依托构成导弹的底层材料、器件、部组件、整机的寿命信息和加速试验成果,自上而下、综合集成、形成加速试验验证方法。分系统/全弹采用贮存寿命加速试验验证与贮存后飞行靶试相结合的试验方案。

2) 利用各整机/分系统的寿命试验数据以及导弹薄弱环节分析结果,结合导弹飞行试验信息和地面试验信息,综合部队的使用维护信息和飞行试验数据,评估导弹分系统/全弹的贮存可靠度。

3 展望

受限于主客观因素的影响,目前导弹装备贮存寿命加速试验技术体系尚不完善,还没有形成相应的标准和规范。随着导弹贮存寿命加速试验技术及寿命评估方法研究的不断深入,将不断加深对导弹贮存寿命指标的认识及对导弹贮存试验的理解。后续将对体系框架中涉及的相关技术问题仍需进一步深入研究。

1) 从原材料、元器件向整机、分系统/全弹级加速试验方向发展。研究表明,仅做低层级产品的加速贮存试验并不能反映高层级产品的真实失效情况,很多在高层级产品上暴露出来的失效现象,不能够通过其所包含的低层级产品的加速贮存试验反映出来。究其原因开展整机、分系统/全弹级产品的加速寿命试验,产品的边界条件更为真实,更能反映产品的真实寿命历程。因此,加速贮存试验的产品层次越高,得出的结论越可信。提升加速试验的应用对象级别是装备贮存可靠性领域亟待解决的问题。

2) 从单应力加速向多应力耦合加速试验方向发展。导弹装备在全寿命周期内经历的阶段及面临的环境因素多样,既有自然环境,又有诱发环境,以及通电工作应力及复杂工况耦合应力。因此,产品的失效往往存在多个失效模式和多个失效机理,从单应力加速向多应力加速方向发展是提高试验验证准确性的关键。开展多应力条件试验能够再现产品实际经受

的、同时发生的应力,能够产生综合的应力效应,因而能够更有效地进行装备的寿命预测及全寿命周期环境适应性的考核验证。

3) 向“环境适应性评价-寿命预测-可靠性验证考核”一体化试验方向发展。环境试验、可靠性试验及寿命试验几乎同样贯穿于产品研制、生产、定型的各个阶段。虽然这些试验随着阶段的不同其目的和针对性都有所不同,但无疑这些试验都是在实验室受控的环境下进行的,所用的环境因素、应力类型和试验设备都基本类似,并且加速寿命试验在一定程度上可以覆盖环境适应性的试验条件,又能够得出量化的可靠性指标。因此开展“环境适应性评价-寿命预测-可靠性验证考核”一体化的试验方法研究,可以推动试验模式的转变,在一定条件下进行试验项目的综合、协调、避免重复试验。

参考文献:

- [1] GJB 450A—2004, 装备可靠性通用工作要求[S].
- [2] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].
- [3] 黄瑞松. 飞行导弹贮存可靠性分析[M]. 北京: 中国航天科工集团第三研究院, 2003.
- [4] 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.
- [5] 谭源源. 装备贮存寿命整机加速试验技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [6] 张生鹏, 李晓刚. 某橡胶减振垫加速贮存老化试验及寿命预测[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 24-28.
- [7] 李晓阳, 姜同敏, 黄涛, 等. 微波电子产品贮存状态的SSADT 评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008(10): 1135—1138.
- [8] 李久祥. 整机加速贮存寿命试验研究[J]. 质量与可靠性, 2004(4): 14-17.
- [9] 张生鹏, 王晓红, 李晓钢. 电子整机加速贮存试验方案设计[J]. 质量与可靠性, 2011(2): 24-28.
- [10] GJB 1307A—2004, 航天火工装置通用规范[S].