

文章编号:1006-9941(2019)12-1004-13

导弹贮存延寿试验关键技术及研究进展

王浩伟^{1,2},滕克难¹,吕卫民¹

(1. 海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001; 2. 北京航空航天大学云南创新研究院, 云南 昆明 650233)

摘要: 导弹贮存延寿是一项兼具经济、军事效益的系统工程,由于国内尚没有科学性、系统性的贮存延寿试验方法,影响了导弹贮存延寿的效果与效率。阐述了导弹贮存延寿试验的基本内涵,总结了贮存延寿试验面临的主要难点,提出了导弹贮存延寿试验的基本流程。将贮存延寿试验分解为自然贮存试验、延寿试验、加速贮存试验、验证性试验4个部分,分析了各部分的主要研究内容与研究进展,凝练了基于自然贮存试验数据的贮存寿命预测、失效机理分析与剩余寿命预测、延寿技术方案统筹、基于实测服役环境的加速贮存试验设计等关键技术。最后,探讨了贮存延寿试验技术的发展趋势与重点研究方向。

关键词: 导弹;贮存延寿;加速贮存试验;自然贮存试验;验证性试验

中图分类号: TJ55; TB114.3

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019038

1 引言

导弹是“长期贮存、一次使用”的武器装备,为了保证导弹在使用时具备较高的安全性与可靠性,每型导弹都有一个预先给出的贮存期^[1-2]。在导弹长期贮存过程中,其电气、机械、密封、物化等性能会不可避免发生退化,导致系统效能降低、故障率升高^[1-3]。当导弹临近规定贮存期时,导弹能否进行延寿,如何进行延寿,成为了各国十分关注的问题。国内外几十年的实践证明,贮存延寿工程是保持导弹战备完好性、提高作战效能、减少保障费用的有效途径^[4-5]。例如,1970年开始服役的美国民兵3导弹经过多阶段延寿,贮存期已经延长至2030年,服役时间长达60年;俄罗斯白杨-M导弹的初始贮存期为10年,经过3次延寿整修后贮存期已延长至21年^[5]。

我国从20世纪70年代开始摸索导弹贮存延寿的途径与方法,经过几十年的探索积累了一些经验,然而

目前还未形成科学性、系统性的贮存延寿试验方法,尚有较多理论难点与技术瓶颈需要解决与突破^[6-7],这导致了各单位的贮存延寿试验做法差别较大,水平参差不齐,制约了导弹贮存延寿的水平与效率。本文结合对引俄导弹贮存延寿的实践经验,提出了导弹贮存延寿试验的基本流程,主要特色是将贮存延寿试验进一步细分为自然贮存试验、延寿试验、加速贮存试验、验证性试验4个部分,在对其研究现状综述、分析的基础上,凝练了各部分的关键技术与科学问题,给出了解决方法或解决思路。

2 导弹贮存延寿试验的基本内涵

2.1 导弹的贮存与延寿

导弹贮存期被定义为导弹在规定贮存条件下满足规定贮存可靠度要求的时间长度,根据此定义,贮存期可以用可靠贮存寿命表示^[1-2]。导弹在贮存期内循环经历库房贮存、装卸转运、战备值班3个阶段,直至发射使用或报废销毁。

贮存期是在导弹研制论证阶段就应明确的指标,需要在导弹研制定型时验证此贮存期指标,即导弹定寿。当导弹在部队服役达到规定的贮存期限时,无论产品的技术状态如何都应该停止使用。在综合考虑军事效益、经济效益以及导弹现有技术状态的前提下,装

收稿日期:2019-02-20;修回日期:2019-04-01

网络出版日期:2019-06-18

基金项目:国家自然科学基金资助(51605487)

作者简介:王浩伟(1981-),男,博士后,主要从事加速退化试验技术与贮存延寿试验技术研究。e-mail:13705355730@139.com

通信联系人:滕克难(1962-),男,教授,主要从事装备贮存延寿技术研究。e-mail:tkn_01@163.com

引用本文: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]. 含能材料, 2019, 27(12):1004-1016.

WANG Hao-wei, TENG Ke-nan, LÜ Wei-min. Review on Key Technologies for Missile Storage and Life-Extension Test[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(12):1004-1016.

备管理机关做出延寿或销毁等决策。导弹贮存延寿是指在规定的保障条件下,围绕恢复状态、延长寿命、提升性能,以可靠性工程理论为指导,针对贮存薄弱环节采取设计、维修、管理等措施,进一步挖掘即将到寿导弹的服役潜力,延长导弹的贮存期^[1]。

2.2 贮存延寿试验的主要难点

导弹贮存延寿可分为贮存延寿试验与贮存延寿工程两个阶段,如图1所示。贮存延寿试验是实施批次导弹贮存延寿工程的必要前提,主要作用包括拟定贮存延寿目标,弄清影响导弹贮存可靠性的薄弱环节,搞清其失效机理,掌握性能变化规律,提出有效的延寿技术措施。

目前,世界各主要军事强国都没有公开导弹贮存延寿试验的技术细节,国内各相关科研单位主要依靠自主探索进行技术积累。导弹贮存延寿试验属于技术难度较大的可靠性试验,主要难点包括:

(1) 导弹组成复杂,失效模式繁多

导弹属于组成复杂的系统级产品,失效原因涉及到分系统、整机、部组件、元器件以及材料等各层级产品,并且导弹各组成涵盖电子产品、光电产品、机械产品、机电产品、复合材料、含能材料、非金属材料等,如图2示。因此,导弹的失效模式繁多,认清各组成的失效机理、掌握性能变化规律、建立失效判据都比较困难。

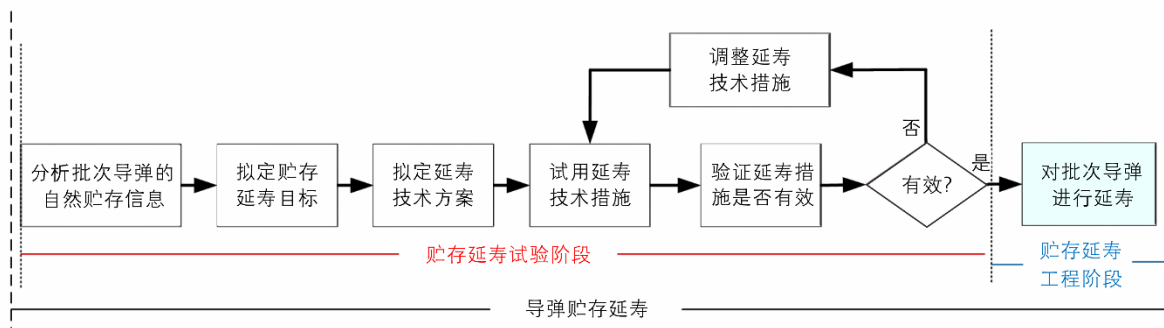


图1 导弹贮存延寿的两个阶段

Fig.1 Two phases of missile storage and life-extension

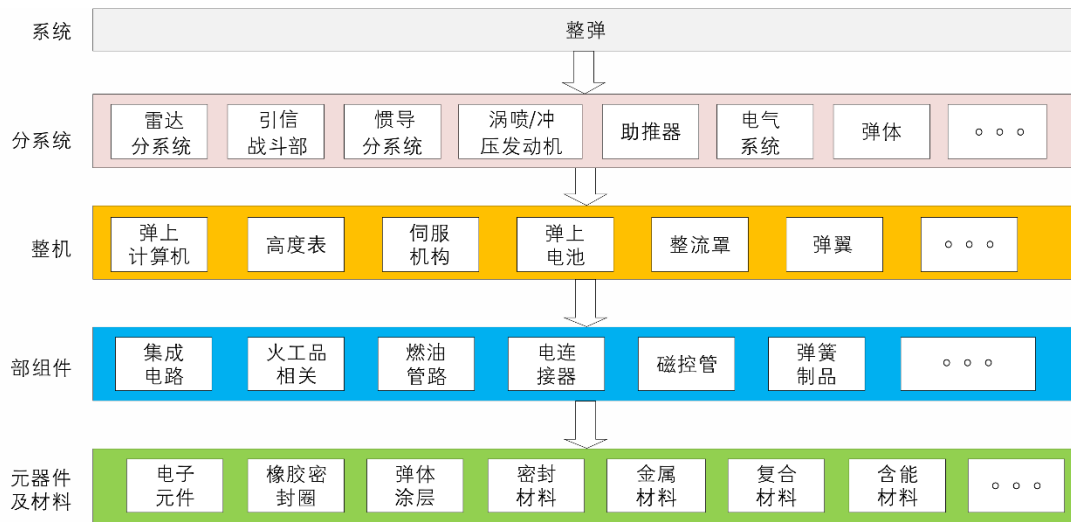


图2 导弹的组成示意图

Fig.2 Schematic diagram of missile structure and composition

(2) 环境载荷效应复杂

影响导弹贮存寿命的自然环境因素包括高温、低温、湿度、高低温交变、盐雾;力学载荷主要包括振动、冲击、摇摆等;电学载荷主要为电应力;生物载荷主要为霉菌。导弹在贮存期内循环经历库房贮存、装卸转运、战备值班等任务,不同贮存任务中的环境载荷效应差异较大,决定了导弹不同的失效机理与寿命特

征^[2-3]。因此,导弹贮存延寿试验需要针对各贮存任务剖面研究环境载荷效应,工作量及工作难度都较大。

(3) 性能监测效率低、难度大

贮存延寿主要研究导弹在非工作状态下的寿命与可靠性问题,由于产品在非工作状态下的性能退化缓慢,导致性能监测的周期长、效率低;此外,很多监测参数无法直接表征出产品的贮存寿命,如何辨识出与产

品贮存寿命相关的参数也是个难题。

(4) 试验样本量小

导弹属于价格较贵的武器装备,可用于延寿试验的样本量普遍较小,对于实弹保有量较低的战略导弹,用于延寿试验的实弹往往只有1枚,这对有效开展贮存延寿试验造成了很大的困难。

(5) 试验项目较多

贮存延寿试验属于复合型可靠性试验,试验类别包括自然贮存试验、加速试验、验证性试验等多种,并且导弹各组成在功能、结构、材料等方面不尽相同,每类试验需要面对多种试验对象,因此试验项目较多。这些试验项目既有工程类试验也有统计类试验,对工程实践经验与试验理论基础都有较高要求。

(6) 试验理论和技术累积不足

目前,国内的导弹贮存延寿试验充满了工程经验色彩,相关理论与技术的累积不足,尚未形成完整、科学的贮存延寿试验方法,更无指导性的军队、行业标准或国家标准,这些都不利于导弹贮存延寿试验的顺利开展。

2.3 贮存延寿试验的基本流程

现有文献对导弹贮存延寿试验技术的阐述较为笼统,不利于把握关键技术、解决科学问题。在参考俄罗斯导弹延寿试验的部分做法和笔者多年工程实践经验的基础上,提出了一种导弹贮存延寿试验的基本流程与技术框架,将贮存延寿试验细分为4个过程,依次为自然贮存试验、延寿试验、加速贮存试验、验证性试验,如图3所示。自然贮存试验的开始时间一般是在导弹研制定型后,直至导弹全寿命周期结束^[1-2]。延寿试验、加速贮存试验、验证性试验是在临近导弹贮存期限时开展,试验周期相对较短,一般为1年左右。

国内一些单位在导弹贮存延寿中把加速贮存试验与自然贮存试验放在了平行的位置,它们都被用于发现导弹的薄弱环节,这是误将加速贮存试验作为高加速应力试验(Highly Accelerated Stress Test, HAST)使用。本文对加速贮存试验的用途做出了新的阐述,完善了验证延寿技术措施有效性的方法,能够提高导弹贮存延寿试验的科学性与可信性。

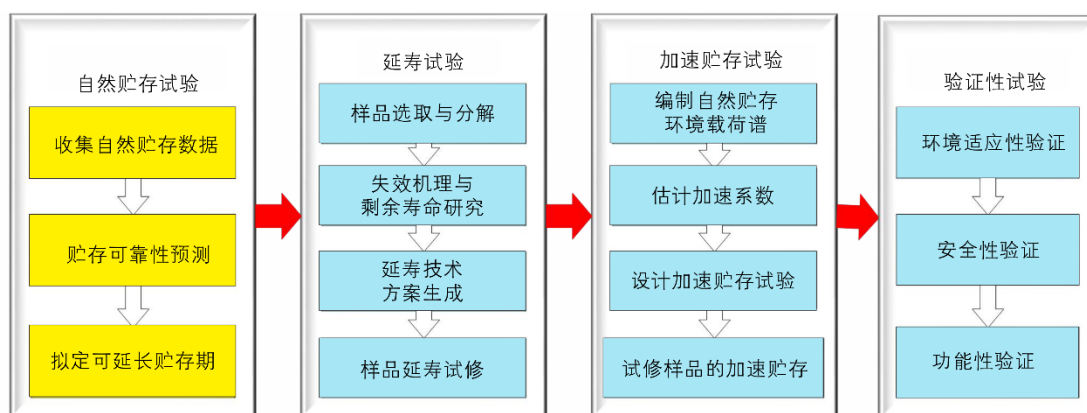


图3 导弹贮存延寿试验的基本流程

Fig.3 Fundamental flow of missile storage and life-extension test

3 导弹贮存延寿试验的关键技术

3.1 自然贮存试验技术

3.1.1 自然贮存试验的两种类型

广义的自然贮存试验不仅指实验室自然贮存试验,还包括现场自然贮存试验。实验室自然贮存试验是在实验室中模拟试验样品的贮存环境,通过针对性的测试计划与测试手段,对样品的贮存失效模式、失效机理、性能变化规律等进行研究。现场自然贮存试验是指在战斗弹的库房贮存、战备值班、吊装转换等阶段,监测与收集其性能测试数据、环境载荷数据、维修保养数据等信息的过程。两类自然贮存试验各有优

劣,互为补充,表1中对它们的特点进行了比较。

3.1.2 基于自然贮存试验数据的贮存寿命预测

贮存延寿试验中的一项关键技术是基于自然贮存试验数据建立导弹的贮存寿命预测模型,进而外推出贮存可靠度变化曲线,为确定可延长贮存期提供数据支撑。这项工作需要在开展延寿试验前结合导弹现场技术勘验开展,技术路线如图4所示。现场技术勘验属于自然贮存试验的一种补充,由专业试验技术人员到各导弹使用部队,根据勘验大纲对选取的战斗弹进行较为全面的性能测试,掌握导弹的现有技术状态,并确认战斗弹的实际贮存环境、维护保养措施等信息。

基于自然贮存试验数据的导弹贮存寿命预测方法

表 1 现场自然贮存试验与实验室自然贮存试验特点的比较

Table 1 Comparison of the characteristics of natural storage tests between field and laboratory

贮存试验方式	现场自然贮存试验	实验室自然贮存试验
贮存对象	战斗弹	研制样品弹或战斗弹,以及发动机药柱、火工品、电子整机等
贮存场地	部队库房,作战平台等	实验室
贮存环境	真实的自然贮存环境	通常只是模拟库房贮存环境
贮存时间	部队接装后开始贮存	导弹定型后开始贮存
试验类型	完全样本试验	抽样样本试验
测试手段	测试仪器少,测试手段较为简单,	测试仪器丰富,测试手段先进
测试对象	一般只能通过ATS获取电子、机电产品的性能数据	可以通过专业测试手段监测火工品、发动机、甚至战斗部的性能数据
测试时机	结合定期检测、战备任务开展测试	有具体的测试计划安排、数据记录要求、数据分析方法等
主要优势	属于完全样本试验,性能测试数据、环境载荷数据、维修及故障数据等可靠性信息全面	测试手段先进,有助于掌握样品的贮存失效机理及性能变化规律

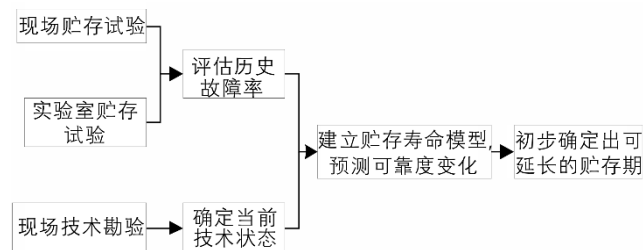


图 4 基于自然贮存数据的贮存可靠度预测

Fig.4 Reliability prediction based on natural storage data

已经被广泛研究,最初的预测方法是基于失效时间数据的。通常步骤是首先收集同型号导弹在各测试时刻的故障数量,然后对导弹故障率随时间的变化规律进行建模,从而预测出故障率低于某个阈值时的贮存寿命。然而,导弹自然贮存试验数据不仅包含失效时间数据,还包含大量的性能测试数据,随着失效物理分析与性能退化监测技术的发展,性能测试数据越来越多被用于预测导弹贮存寿命,融合失效时间数据与性能测试数据进行贮存寿命预测有助于提高预测准确度与置信度^[8]。作为一种依靠定期检测获取性能测试数据的系统级产品,导弹贮存寿命预测的研究重点应该集中于以下三个方向。

(1) 基于竞争失效的寿命预测方法

导弹等装备同时存在多种失效模式和失效过程,其失效是多种失效过程竞争的结果,为了准确预测其寿命信息,竞争失效建模方法成为了寿命预测领域的研究热点。此类方法可以分为两大类:第一类不考虑多失效过程之间的失效相依性,将导弹抽象为一个由多种失效过程组成的串联系统,首先获取各个失效过程对应的可靠度或寿命,进而根据串联关系得出导弹的可靠度或依据木桶短板原理预测出寿命^[9]。例如文献[10]在预测某型导弹装备的贮存寿命时,首先确定

出影响导弹贮存可靠性的5种关键部件,然后通过定期测试数据分别建立各部件的退化失效模型,最后假定各部件的失效过程相互独立进行导弹贮存寿命预测。第二类方法将装备失效分为退化失效与突发失效两大类,寿命预测时考虑了退化失效与突发失效之间的相依性^[11-14]。目前的研究热点是利用Copula函数建立多元退化过程之间的相关性,并利用非齐次泊松随机冲击过程描述产品突发失效的机理,将随机冲击量分为无害区,危害区和致命区,认为随机冲击量位于危害区时引发产品性能退化量的跃升,达到致命区时造成突发失效,据此建立了突发失效与退化失效之间的相依性^[15-17]。此类方法可以较好解释装备突发失效的产生机理,然而由于目前缺少监测随机冲击发生时间与冲击量大小的技术手段,只能依靠主观判断或专家经验指定模型参数值,限制了此类方法的工程应用。

(2) 基于多源数据融合的使用寿命预测方法

目前,对导弹进行寿命预测时还主要利用部队贮存阶段的可靠性数据。实际上,在导弹研制试验、定型试验、验收试验等阶段都存在一些有价值的可靠性数据,有效利用这些数据将会提高贮存寿命的预测准确度。此外,导弹可靠性数据除了具有多阶段分布的特征外,还具有多类型、多来源的特点,例如可靠性数据类型可分为性能退化数据、失效时间数据、截尾寿命数据等多种;可靠性数据可来源于自然贮存试验、加速寿命试验,加速贮存试验、甚至仿真试验等。

为了提高寿命预测结果的准确性,如何有效融合更多、更真实的可靠性数据进行寿命预测是导弹寿命预测领域的研究热点^[18-20]。目前,Bayes方法是融合多源信息的主要手段,基本步骤是首先将寿命预测模型的参数设为服从某一分布函数的随机参数,然后利用可信的

先验信息确定随机参数的先验分布,最后,根据 Bayes 方法融合现场信息实现参数估计及寿命预测^[21-23]。Gebraeel & Pan^[24]建立了滚珠轴承性能退化模型,将模型参数随机化并采用 Bayes 方法融合产品个体退化数据、总体退化特征以及实时负载量和转速,从而得出轴承在动态环境下的剩余寿命。王浩伟等^[25-26]利用随机过程对导弹部件性能退化建模,以加速退化数据为先验信息,通过 Bayes 方法融合定期测试数据来估计退化模型参数的后验均值,克服因定期测试数据较少造成模型参数估计值的准确度和置信度不高的问题。

(3) 非恒定贮存环境下的寿命预测

非恒定环境下的寿命预测方法研究始于 20 世纪 90 年代,在 2010 年后成为了研究热点^[27]。Liao & Tian^[28]提出了基于动态环境进行产品个体寿命预测的技术框架,假定 Wiener 过程的漂移参数与环境协变量有关,利用 Bayes 方法融合先验加速退化数据,现场性能退化数据和现场环境信息建立预测模型,采用 MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 法解析模型参数。Peng 等^[29]在采用 Bayesian 方法融合退化数据与环境数据时,利用连续时间 Markov 过程对环境数据进行建模,从而更准确地预测产品寿命。以上研究的本质是在融合多种环境剖面下的测试数据的基础上预测装备在某一环境剖面下的寿命,这尚不能真正预测出装备在动态环境下的寿命值。与此不同,文献[30]利用 Gamma 分布描述导弹发射箱内的温度变化,采用比例风险模型融合温度协变量进而建立条件寿命预测模型,预测出导弹部件在动态温度下的贮存寿命。文献^[31]以使用频率作为环境协变量,采用累计损伤模型将环境协变量融入寿命分布函数中,得出了条件可靠度函数,用于预测产品在 4 种使用频率动态转换环境下的寿命。

3.2 延寿试验技术

3.2.1 延寿试验的主要内容与基本流程

延寿试验用于确定影响导弹贮存可靠性的薄弱环节,并提出针对性的整改措施,确保导弹在延长贮存期内满足要求的安全性及可靠性^[1]。无论是战术导弹或是战略导弹,都可分解为若干个功能独立的分系统,如冲压发动机、固体助推器、弹体弹翼、引信战斗部、导引头、驾驶仪、弹上电气系统等^[1-4]。导弹各分系统功能独立、专业差别较大,因此国内外普遍以分系统为基本单位开展延寿试验。延寿试验应有导弹分系统研制生产单位参与,这不仅有利于发挥生产单位的装配技术、测试手段、维修能力,而且能够有效利用产品研制阶段

掌握的可靠性信息。延寿试验样品一般选取部队的战斗弹,也可以使用实验室贮存试验的整弹或平贮件,选取战斗弹样品的时候应该考虑服役地域的分散性,并且优先选取战备值班累积时间长的导弹。延寿试验可分为两个阶段:首先研究各层级产品的贮存失效模式与失效机理,预测剩余寿命是否大于导弹的延长贮存期;然后提出整修、改进、性能提升等措施,对试验样品进行延寿试修。延寿试验的主要内容与基本流程如图 5 所示。

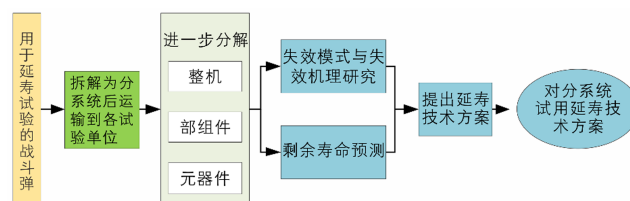


图 5 延寿试验的主要内容与基本流程

Fig.5 The main contents and basic flow of life-extension test

3.2.2 失效机理分析与剩余寿命预测

为了详细了解导弹各组成的贮存失效模式与失效机理,需要将各分系统进一步分解为整机、部组件、元器件,研究其技术状态、老化情况等。文献[2]对导弹典型材料、元器件、部组件的失效模式与失效机理进行了较为详细的总结,为开展延寿试验提供了坚实的基础。随着新材料、新工艺、新技术的不断运用,需要继续加大对贮存失效模式与失效机理的研究,丰富可靠性基础数据库。

为了保证导弹在延长贮存期内满足要求的可靠性与安全性,需要判断各层级产品的剩余寿命是否大于延长贮存期^[32]。对于火工品、电子产品、光电产品、机械产品、机电产品、复合材料等,剩余寿命预测方法不一而足。为了节约试验经费、提高延寿试验效率,针对不同的产品应采用针对性的剩余寿命分析方式,几种常用的剩余寿命预测方式总结见表 2。

加速寿命试验 (Accelerated Life Test, ALT) 采用提升环境应力水平的方式加速产品失效过程,是一种预测产品剩余寿命与可靠性的高效手段。特别是对于缺乏可靠性信息的新材料、新工艺产品,加速寿命试验对于确认产品的失效模式与失效机理,掌握产品的性能退化规律与寿命分布特征具有显著作用。由于加速寿命试验属于统计类可靠性试验,与高加速应力试验等工程类试验相比,需要额外考虑试验数据统计模型构建^[33-35]、失效机理一致性辨识^[36-37]、参数估计与置信度确定^[38-39]等问题,在加速试验方案设计方面也有更高的要求^[40-42]。随着加速试验设备能力和

表 2 不同产品剩余寿命预测的几种方式

Table 2 The approaches for predicting residual life of different products

主要产品类型	剩余寿命预测方式	备注
弹体结构、涂层、典型电子器件等	根据研制阶段已知寿命信息	-
雷达导引头、惯导等电子及机电产品,推进剂药柱等	利用自然贮存试验数据预测寿命值	自然贮存阶段可获得足够可靠性数据的产品
发动机燃油、吊装滑块等	理化分析判断剩余寿命值	-
集成电路、机电产品、发动机等	根据相似型号产品寿命信息估计剩余寿命值	-
弹体、弹翼等机械结构件	根据专家经验判断剩余寿命值	-
密封件、紧固件、火工品、电子产品、引信、	开展寿命试验预测剩余寿命值	常应力寿命试验
弹上电池、电气系统等		加速寿命试验(加速退化试验)

试验数据统计建模技术的进步,依次发展了恒定应力、步进应力、步降应力、序进应力等加速寿命试验方式;随着失效机理分析及测试检测技术的发展,加速寿命试验演变出加速退化试验(Accelerated Degradation Test, ADT)类型;为了更为真实得模拟产品的实际使用环境及提高试验效率,已由最初单应力加速试验发展到双应力、多应力加速寿命试验^[43]。

针对长期处于贮存任务的导弹元器件、部组件,加速寿命试验的主要加速应力类型为温度,还涉及湿度、电应力、振动;主要的加速应力施加方式为:恒定应力或步进/降应力;寿命分布模型主要为:威布尔分布、对数正态分布、指数分布、正态分布;主要的性能退化模型为:物理失效模型、随机过程模型、退化量分布模型、多项式拟合模型;模型参数统计推断方法主要为最小二乘法(Least Square Estimation, LSE)、极大似然法(Maximum Likelihood Estimation, MLE),特殊情况下也适合采用图估计法、矩估计法、期望最大化法(expectation Maximization, EM)。涉及弹上产品加速寿命试验方法的国家标准、军用标准及行业标准还不多,表3中介绍了弹上产品的主要加速寿命试验标准。

弹上产品各加速寿命试验标准中的应力类型普遍为温度,加速模型大多采用Arrhenius方程,但寿命分布模型不尽相同,并且很多标准中并未指明。对于没有给定寿命分布模型的情况,一般是利用各应力水平下的寿命平均值结合加速模型外推常应力下的寿命平均值,也可以通过拟合检验方法择优选择产品的寿命分布类型^[50],以便获取产品的可靠寿命、中位寿命等指标。除了火工品试验-71℃试验法给出了加速模型及参数值^[44],各标准只是给出了加速模型的类型,需要进一步利用加速寿命数据估计出加速模型的参数值。对于Arrhenius等单应力加速模型,模型参数个数为2,理论上只需要设置2个等级的加速应力即可估计出模型参数值,然而,为了提高参数值估计准确度,各标准中都规定了更多的加速应力等级数量。

目前,导弹产品加速寿命试验的相关标准还较少,覆盖的产品类别有限,并且大多数标准较为陈旧,在试验方式、测试手段、加速模型、统计分析方法等方面都与现有技术水平存在差距。因此,一方面要完善导弹产品的加速寿命试验标准体系,另一方面要引入综合应力加速试验技术、多应力耦合加速模型、竞争失效寿命模型等先进方法。

表 3 主要的弹上产品加速寿命试验标准

Table 3 Main standards of accelerated life test for missile-borne products

产品类型	应力类型	加速模型	加速应力安排	寿命分布模型	备注
火工品 ^[44]	温度	修正的 Arrhenius	恒定应力(71℃)	-	加速系数已知
火工品 ^[45]	温度	Arrhenius	恒定应力(不少于4个等级,建议在323~363K)	推荐对数正态分布	加速系数未知
固体推进剂 ^[46]	温度	Arrhenius	恒定应力(不少于3个等级,相邻应力大于10℃)	-	用于外推平均寿命
橡胶产品 ^[47]	温度	Arrhenius Williams Landel Ferry	恒定应力(不少于3个等级)	-	外推平均寿命
弹药元件 ^[48]	温度	Arrhenius	步进应力(60,67,74,80℃)	威布尔分布	
电子元器件 ^[49]	温度 电压	Arrhenius Inverse Power Law	恒定应力(不少于4个等级)	对数正态分布	

3.2.3 延寿技术方案统筹

提高导弹贮存可靠性、延长导弹贮存期的技术手段主要有薄弱件整修、寿命件更换、性能改进与新技术应用、放宽失效判据、改进维护措施等^[51]。导引头射频电路、惯导伺服机构等电子、机电设备故障率相对较高,是影响导弹贮存可靠性的薄弱环节,延寿时应针对性地提出整修措施。弹上蓄电池、发动机燃油、部分密封件等具有性能退化现象,属于有限寿命产品,应进行定期更换;性能改进与新技术应用不仅可以延长导弹的贮存期,而且能够提高导弹的使用价值,这对于贮存期较长的战略导弹来说尤为重要。例如,美国对“民兵”导弹、“三叉戟”导弹等在多次延寿中分别更换了固体火箭发动机增加导弹航程并提升突防能力,改进了制导系统提升导弹的抗干扰能力及制导精度,改装战斗部适应导弹多样化的作战需求^[52-53]。为了保证导弹的安全性与可靠性,在产品设计中通常留有一定的设计余量,放宽失效判据是在对导弹服役阶段可靠性数据充分分析的基础上,通过调整失效判据释放部分设计余量,从而达到延长贮存期的目的。改进维护措施是指导弹使用单位优化检测周期、改善贮存环境条件、提高检测维修能力等措施^[54]。

延长导弹贮存期的技术手段有多种,如何综合运用各技术手段取得最优延寿效果是一个值得研究的问题^[55-56]。可以将延寿技术方案生成问题转换为线性或非线性规划问题,例如将可行的延寿技术措施作为决策变量,将延寿总费用等作为约束条件,将最大效费比等作为优化目标,从而获取最优的延寿技术方案,如图6所示。需要指出的是,有可能得出的延寿技术方案只包括改进导弹使用单位的技术维护措施、甚至是保持现有技术维护措施,相对于整修延寿可称之为指标延寿,指标延寿的概念也在飞机、核电站、桥梁等的

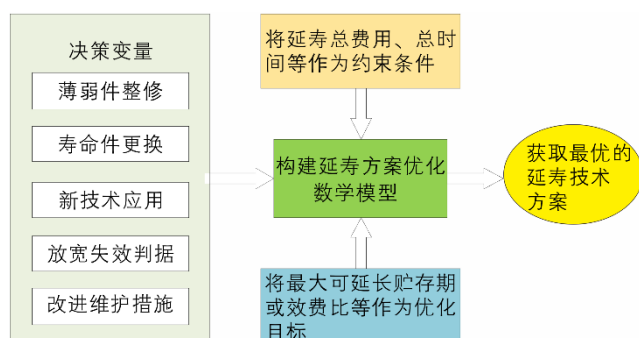


图6 获取最优延寿技术方案的技术路线

Fig.6 The technical route of obtaining the optimal life-extension solution

延寿领域有所应用^[57-58]。

3.3 加速贮存试验技术

3.3.1 加速贮存试验的用途与关键技术

假设导弹的延长贮存期为 N 年,延寿技术方案能否保证导弹在 N 年延长贮存期内满足要求的可靠水平与安全性要求?这是在对批次导弹开展延寿工程前需要回答的难题。考虑到导弹贮存延寿工程的紧迫性,不允许通过 N 年自然贮存过程考核延寿技术方案的有效性。一种高效、可行的解决方案是利用短时间的加速贮存等效试验样品的 N 年自然贮存,然后开展验证性试验考核延寿技术方案的有效性。

加速贮存试验(Accelerated Storage Test, AST)是高效验证导弹贮存期的关键环节^[59-62],其实质是通过施加比自然贮存环境高的应力水平,在短时间内使试验样品的累积损伤(寿命消耗)等效 N 年自然贮存的效果,如图7所示。



图7 加速贮存试验用途示意

Fig.7 Schematic of accelerated storage test

加速贮存试验技术的核心与关键是估计出试验产品的加速系数,试验产品层级越高、贮存任务剖面越复杂,估计加速系数的难度越大。目前,我国尚未完全掌握分系统级产品加速贮存试验技术,但俄罗斯已经掌握整弹级加速贮存试验技术,曾利用6个月加速贮存试验等效C-300导弹10年的自然贮存过程。现有加速贮存试验技术主要有以下两个方面不足:

(1) 加速贮存试验的应力类型简单。

影响海军导弹贮存可靠性的敏感环境应力包括库房贮存阶段的温度,战备值班阶段的高低温交变、低温、温湿效应,装卸转运阶段的振动、冲击,因此,加速贮存试验应该由高温加速试验、高低温交变加速试验、低温加速试验、振动加速试验等组成。然而,国内很多单位仅仅进行高温加速贮存试验,这无法等效导弹的整个自然贮存过程,导致加速贮存试验的科学性与可信性不高。

(2) 缺少分系统/整机产品加速系数估计理论与方法。

如果不能准确估计出试验产品在各加速应力下的加速系数,就无法在加速贮存试验时间与自然贮存时间之间进行等效折算。目前,估计整机加速系数时普

遍将整机简化为由元器件、部组件组成的串联模型,假定各组成的寿命都服从指数分布^[63],公式为:

$$A_{k,0} = \frac{\lambda(S_k)}{\lambda(S_0)} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \lambda_i(S_k)}{\sum_{i=1}^N n_i \lambda_i(S_0)} \quad (1)$$

式中, $A_{k,0}$ 表示整机在加速应力 S_k 下相对于正常应力 S_0 的加速系数, $\lambda(S_k)$ 表示整机在 S_k 下的失效率, $\lambda(S_0)$ 表示整机在 S_0 下的失效率, N 表示元器件、部组件的种类, n_i 表示每种元器件或部组件的数量, $\lambda_i(S_k)$ 表示第 i 种元器件或部组件在 S_k 下的失效率。这种加速系数估计方法只适用于电子设备,而且限于温度加速应力,适用范围较小。

表 4 加速贮存试验与加速寿命试验的比较

Table 4 Comparison between accelerated storage test and accelerated life test

	加速寿命试验	加速贮存试验
试验对象	主要为材料、元器件、部组件	主要为整机、分系统、整弹
试验目的	高效获取产品在各加速应力下的失效时间数据或性能退化数据	等效产品若干年的自然贮存过程
试验总时间	一般视情停止试验,时间不确定	定时截尾,时间确定
试验用途	可靠性评估或寿命预测	贮存期或寿命预测值验证
应力类型	温度、湿度、振动、电应力等	温度、高低温交变、湿度、振动、电应力等
应力等级	需要设置不少于 3 级加速应力	仅需 1 级加速应力
样本量	一般不低于 20	一般 1-4
加速模型	必须使用加速模型	可不使用加速模型
关键环节	试验数据建模与统计分析	试验方案设计
测试方面	试验过程中需要频繁测试样品	试验过程中可以不进行测试
在贮存延寿中的应用时机	延寿技术措施试用前	延寿技术措施试用后
在贮存延寿中的主要作用	1. 分析薄弱环节或关键件的失效规律与失效机理 2. 预测产品的剩余寿命	1. 了解产品在延长贮存期内的性能变化规律 2. 验证延寿技术措施是否可行

3.3.2 基于实测服役环境的加速贮存试验设计

自然环境以年为周期循环变化,导弹的贮存环境也呈现年周期变化的特点。据此,设计 1 个周期的加速贮存试验等效导弹的 1 年自然贮存过程。设计 1 个周期加速贮存试验的基本步骤为:

(1) 对导弹在库房存放、卸装转运、战备值班等贮存任务剖面下的失效模式与失效机理进行分析,确定出导弹在各贮存任务剖面下的敏感环境应力类型;

(2) 采集敏感环境应力数据至少 1 年,根据历年统计的库房存放、卸装转运、战备值班的平均时间比例,编制导弹的年周期自然贮存环境谱;

(3) 对自然贮存环境谱中的每种应力类型,可能为温度、振动、冷冻、高低温交变、温湿、温振中的单应力及综合应力,设计加速应力水平,其设计原则是在不改变导弹失效机理的前提下尽可能加大加速应力水

提升加速贮存试验技术水平的关键是要突破加速系数估计理论,一种可行的方法是基于失效模式与加速模型估计加速系数^[64]。为了解决加速模型参数值估计难题,可以首先结合可靠性数据统计分析与专家经验初步确定参数值,然后融合以后的现场试验数据不断修正参数值。加速贮存试验与加速寿命试验是导弹贮存延寿试验中用到的两种不同的加速试验技术,虽然两者具有很多的相似之处,但存在较大不同,具有各自的特点、关键技术与应用领域。由于目前两者经常被混淆,不利于导弹贮存延寿试验的开展与加速试验技术的发展,表 4 中简要地对此两种加速试验技术进行了比较。

平,以节省试验时间和经费;

(4) 对于导弹的每种敏感环境应力,分别估计出加速应力水平相对于自然环境应力水平的加速系数,进而折算出各加速应力水平的作用时间,最终合成出 1 个周期的加速贮存试验谱。

假设导弹的延长贮存期为 N 年,加速贮存试验设计与实施的流程图如图 8 所示。

根据图 8 所示技术流程,对某型导弹分系统设计了 1 个周期的加速贮存试验谱,如图 9 所示。

3.3.3 加速贮存试验时间确定方法

从统计学的角度,导弹的贮存寿命是一个服从某一分布函数的随机变量,对于延寿试验中的小样本量情况,导弹试验样品的贮存寿命难以表征批次导弹的总体贮存寿命。如果要验证批次导弹的 N 年延长贮存期,只进行等效 N 年自然贮存的加速贮存试验是否

科学、可信,成为了工程技术人员担心的问题。工程实践中,通常引入裕度系数确定加速贮存试验截尾时间。例如,导弹的 N 年自然贮存过程可利用 N 个周期的加速贮存试验等效,裕度系数为 $k = 1.2$,加速贮存试验时间为 $t = k \cdot N \cdot t_A$, t_A 表示一个周期加速贮存试验的

时间。然而,这种基于工程经验的做法依然缺少科学性与理论性。目前,还可以考虑以下两种确定加速贮存试验时间的途径:一是借鉴可靠性验收与鉴定试验的方法与思路,二是采用系统可靠性模型的思路。

(1) 借鉴可靠性验收与鉴定试验的思路

GJB889A^[65]中假定试验样品的寿命服从指数分布设计验收或鉴定试验方案。根据其定时试验统计方案,如果在各试验样品累计试验时间 t_z 内故障样品数量不高于 r ,则试验样品通过验收或鉴定试验。

t_z 由(2)式计算得出:

$$t_z = \frac{N \cdot t_A}{2} \chi_{\beta, 2r}^2 \quad (2)$$

式中, β 表示使用方风险, $\chi_{\beta, 2r}^2$ 是自由度为 $2r$ 的 χ^2 分布 β 上侧分位数。以上思路可被借鉴用于验证性试验,采用式(2)确定出所有试验样品的加速贮存试验总时间。然而,导弹的贮存寿命不符合指数分布,需要研究一种基于 Weibull 分布的验证公式。

(2) 基于系统可靠性模型的方法

根据文献[66],加速贮存试验时间 t 可通过(3)式计算得出:

$$t = \frac{N \cdot t_A \cdot (-\ln(1 - \gamma)/n)^{1/\lambda}}{(-\ln R)^{1/\lambda}} \quad (3)$$

式中, γ 为置信度, n 为试验样本量, λ 为 Weibull 分布的形状参数, R 表示贮存可靠度。

以上两类确定加速贮存试验时间的方法各有优

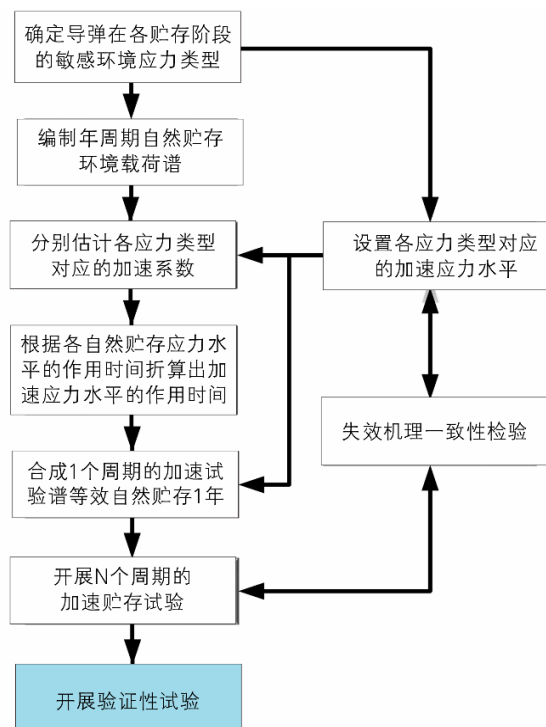


图8 加速贮存试验设计与实施的流程
Fig.8 The flow of design and implementation of accelerated storage test

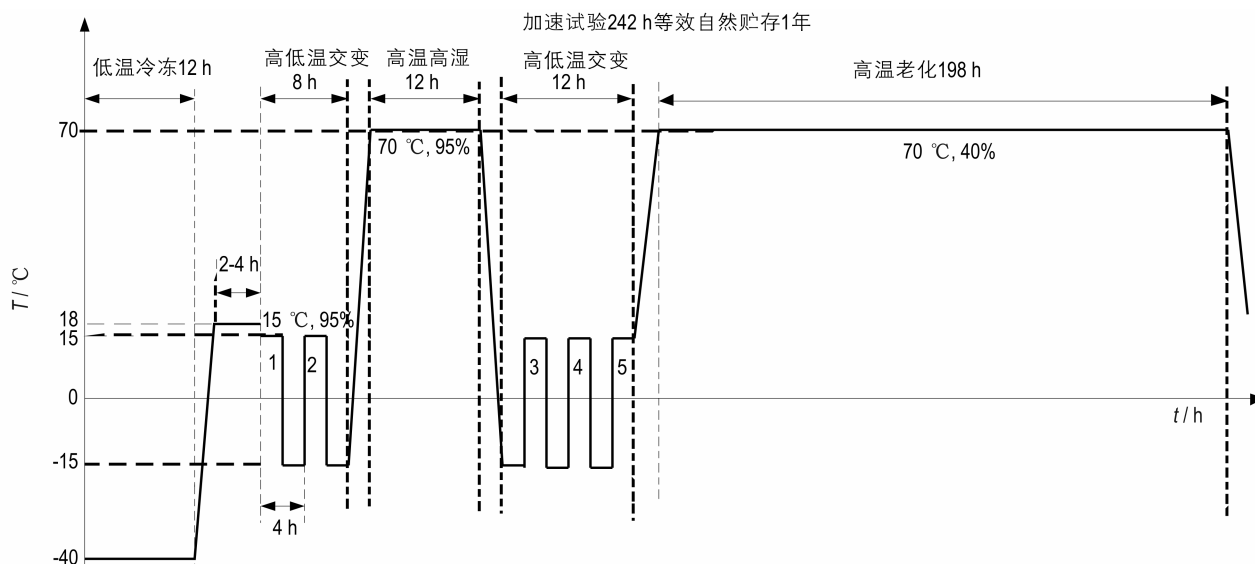


图9 某型导弹分系统1个周期加速贮存试验时序图
Fig.9 The sequence diagram of 1 cycle of accelerated storage test for a missile subsystem

劣,第一种方法最大的优点是能够考虑试验样品间的个体差异,即使有试验样品发生故障,只要试验总时间达到某值也能表明通过验证试验;第二种方法中,各样品在经过 t 小时加速贮存试验后,只要有1个样品出现故障即表明没通过验证试验。

3.4 验证性试验技术

验证性试验中,不仅需要验证导弹在经过等效 N 年自然贮存后的贮存可靠性,还要验证其使用可靠性。验证性试验分为导弹分系统验证、整弹验证两个层级,分系统验证试验可分为如下4部分:(1)标准贮存环境下的性能测试;(2)环境适应性试验;(3)环境适应性试验后的安全性试验;(4)环境适应性试验后的功能性试验。

(1)是用于考核试验样品在标准贮存环境下的性能状态,而(2)中的环境适应性试验是用于考核产品在极限贮存环境下(如特殊战备值班)的性能状况,试验项目从GJB150A-2009规定的各项目中选择,一般应包括高温试验、低温试验、振动试验、力学冲击试验、温度冲击试验等。对于固体助推器、涡喷发动机、引信战斗部等分系统,验证试验还应包括安全性试验、功能性试验。安全性试验包括引信战斗部、助推器、油箱等的防火防爆试验、跌落试验,功能性试验包括涡喷发动机的推力测试、助推器的点火试验、引战系统的作战毁伤试验、火工品功能试验等。

受到试验样本量、试验经费、进度要求的制约,目前导弹贮存延寿中的整弹验证性试验开展得较少。可将经过加速贮存试验的各分系统恢复成整弹,视情安排整弹安全性试验与功能性试验,试验项目参考导弹研制定型阶段的各试验项目。如果试验样品通过了验证性试验,即可按照既定延寿技术方案开展批次导弹的贮存延寿工程。如果试验样品没有通过验证性试验,有两种可行的解决方案:一是调整延寿技术措施,二是缩短延长的贮存期限。

4 发展趋势与总结

4.1 发展趋势

(1)自然贮存试验中,先进的性能监测手段与技术将不断运用于导弹装备,原位监测、实时监测、远程监测是性能监测技术的发展趋势。基于自然贮存试验数据的贮存寿命预测方法,应着重研究以下三个方向:基于竞争失效的贮存寿命预测,基于多源信息融合的贮存寿命预测,非恒定环境载荷下的贮存寿命预测。

(2)延寿试验中,需要进一步丰富贮存失效机理分析手段,建立基础材料、元器件的贮存失效指标体系与判据;基于失效物理过程的性能退化建模方法研究将会是剩余寿命预测方法的重点研究方向,这有助于掌握产品失效机理、改进设计,从根本上提升贮存可靠性。

(3)导弹贮存延寿的根本目的是提升装备的经济效益与军事效益,目前基于专家经验的延寿技术方案确定方式较为粗放,难以获取最大的经济与军事效益,未来的发展方向在于采用数学建模量化寻优的办法,遴选出最优的延寿技术方案。

(4)加速试验对于提高贮存延寿试验效率、节省试验经费具有重要作用,因此,加速试验在整个贮存延寿试验中的地位将会更加显著。发展趋势将是减少低层级产品的加速寿命试验,完善高层级产品的加速贮存试验技术。加速贮存试验的对象将会从分系统级产品提升到整弹,加速贮存试验的应力种类更为丰富,试验项目扩展到加速冲击试验、加速倾斜摇摆试验等,从而能够等效导弹更复杂的自然贮存过程。

(5)目前的导弹加速贮存试验技术尚不成熟,理论、方法体系有待于完善,需重点突破的关键技术包括:自然贮存环境载荷谱编制、系统级加速系数估计、加速贮存试验设计。基于失效模式与加速模型的加速系数估计方法具有较好的科学性与可行性,应是未来的研究重点。

(6)由于导弹安全性试验与功能性试验的成本高,造成贮存延寿中的验证性试验很难充分开展。应大力发展仿真性验证试验,配合传统方式验证性试验更为经济、更为全面开展各项验证工作。

4.2 总结

导弹贮存延寿试验属于复杂的系统性可靠性试验,隐含着较多理论方法、关键技术与科学问题,其技术水平体现了我国可靠性试验的综合能力。本文提出了导弹贮存延寿试验的基本流程,凝练了贮存延寿试验的关键技术,讨论了广泛存在的难点与疑点问题,展望了进一步的研究方向,对于走出国内现有贮存延寿试验方法的局限,突破贮存延寿试验的技术瓶颈,建立科学性、系统性的导弹贮存延寿试验解决方案,具有重要的科学意义与工程实用价值。

参考文献:

- [1] 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,2013:5-29.
MENG Tao, ZHANG Shi-nian, Yi Dang-xiang, et al. Introduction to missile storage life extension technology[M]. Beijing:

- China Aerospace Press, 2013: 5-29.
- [2] 李久祥, 申军. 装备贮存延寿技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007: 1-38.
LI Jiu-xiang, SHEN Jun. Equipment storage life-extending technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2007: 1-38.
- [3] 祝学军, 管飞, 王洪波, 等. 战术弹道导弹贮存工程基础[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2016: 10-21.
ZHU Xue-jun, GUAN Fei, WANG Hong-bo, et al. Tactical ballistic missile storage engineering foundation[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2016: 10-21..
- [4] Heller M, Calero J, Wescott R, et al. Life extension of F/A-18 LAU-7 missile launcher housings using rework shape optimisation [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 891-892: 739-744.
- [5] 王宜晓, 刘晓恩. 美国“民兵”3和“三叉戟”2导弹改进计划综述[J]. 中国航天, 2011(3): 35-37.
WANG Yi-xiao, LIU Xiao-en. Summary of U.S. minuteman 3 and trident 2 missile improvement programs [J]. *Aerospace China*, 2011(3): 35-37.
- [6] 张百勇, 刘凯, 孙炯, 等. 国内外武器装备延寿技术概论[J]. 舰船电子工程, 2017(4): 10-13.
ZHANG Bai-yong, LIU Kai, SUN Jiong, et al. Introduction of life extension technology of weapon equipment at home and abroad[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2017(4): 10-13.
- [7] 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.
- [8] Peng W W, Huang H Z, Xie M, et al. A Bayesian approach for system reliability analysis with multilevel pass-fail, lifetime and degradation data sets[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2013, 62(3): 689-699.
- [9] Luo W, Zhang C H, Chen X, et al. Accelerated reliability demonstration under competing failure modes [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 136: 75-84.
- [10] 罗湘勇, 黄小凯. 基于多机理竞争退化的导弹贮存可靠性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5): 701-705.
LUO Xiang-yong, HUANG Xiao-kai. Storage reliability analysis of missile based on multi-mechanism competition degradation method [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(5): 701-705.
- [11] 王浩伟, 徐廷学, 冯玉光. 基于退化失效与突发失效竞争的导弹剩余寿命预测[J]. 航空学报, 2016, 37(4): 1240-1248.
WANG Hao-wei, XU Ting-xue, FENG Yu-guang. Remaining life prediction based on competing risks of degradation failure and traumatic failure for missile[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(4): 1240-1248.
- [12] Fan M G, Zeng Z G, Zio E, et al. Modeling dependent competing failure processes with degradation-shock dependence [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 165: 422-430.
- [13] Che H, Zeng S, Guo J, et al. Reliability modeling for dependent competing failure process with mutually dependent degradation process and shock process[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 180: 168-178.
- [14] 王浩伟, 滕克难, 李军亮. 随机环境应力冲击下基于多参数相关退化的导弹部件寿命预测[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3404-3412.
WANG Hao-wei, TENG Ke-nan, LI Jun-liang. Lifetime predic-
- tion for missile components based on multiple parameters correlative degrading with random shocks of environmental stresses [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(11): 3404-3412.
- [15] Ye Z S, Tang L C, Xu H Y. A distribution-based systems reliability model under extreme shocks and natural degradation [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2011, 60(1): 246-256.
- [16] Jiang L, Feng Q, Coit D W. Modeling zoned shock effects on stochastic degradation in dependent failure processes [J]. *IIE Transactions*, 2015, 47(5): 460-470.
- [17] Fan M F, Zeng Z G, Zio E, et al. A stochastic hybrid systems model of common-cause failures of degrading components[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 172: 159-170.
- [18] 王浩伟, 徐廷学, 周伟. 综合退化数据与寿命数据的某型电连接器寿命预测方法[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(5): 702-706.
WANG Hao-wei, XU Ting-xue, ZHOU Wei. Lifetime prediction method for missile electrical connector synthesizing degradation data and lifetime data[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2014, 48(5): 702-706.
- [19] Wang L, Pan R, Wang X, et al. A Bayesian reliability evaluation method with different types of data from multiple sources[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 167: 128-135.
- [20] Peng W W, Li Y F, Mi J H, et al. Reliability of complex systems under dynamic conditions: A Bayesian multivariate degradation perspective[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 153: 75-87.
- [21] 徐廷学, 王浩伟, 张鑫. EM算法在Wiener过程随机参数的超参数估计中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(3): 702-712.
XU Ting-xue, WANG Hao-wei, ZHANG Xin. Application of EM algorithm to estimate hyper parameters of the random parameters of Wiener process[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(3): 702-712.
- [22] 王小林, 郭波, 程志君. 融合多源信息的维纳过程性能退化产品的可靠性评估[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 977-982.
WANG Xiao-lin, GUO Bo, CHENG Zhi-jun. Reliability assessment of products with Wiener process degradation by fusing multiple information [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(5): 977-982.
- [23] Jin G, Matthews D E, Zhou Z. A Bayesian framework for on-line degradation assessment and residual life prediction of secondary batteries inspacecraft [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2013, 113: 7-20.
- [24] Gebraeel N, Pan J. Prognostic degradation models for computing and updating residual life distributions in a time-varying environment[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2008, 57(4): 539-550.
- [25] 王浩伟, 徐廷学, 赵建忠. 融合加速退化和现场实测退化数据的剩余寿命预测方法[J]. 航空学报, 2014, 35(12): 3350-3357.
WANG Hao-wei, XU Ting-xue, ZHAO Jian-zhong. Residual life prediction method fusing accelerated degradation and field degradation data[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(12): 3350-3357.
- [26] Wang H W, Xu T X, Wang W Y. Remaining life prediction based on Wiener processes with ADT prior information [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2016, 32(3): 753-765.
- [27] 王浩伟, 滕克难, 奚文骏. 非恒定环境下基于载荷谱的导弹部件

- 寿命预测[J]. 兵工学报, 2016, 37(8): 1524-1529.
WANG Hao-wei, TENG Ke-nan, XI Wen-jun. Load spectra-based lifetime prediction for missile components under varying environment[J]. *Acta Armamentar II*, 2016, 37(8): 1524-1529.
- [28] Liao H, Tian Z. A framework for predicting the remaining useful life of a single unit under time-varying operating conditions[J]. *IIE Transactions*, 2013, 45(9): 964-980.
- [29] Peng W W, Li Y F, Yang Y J, et al. Leveraging degradation testing and condition monitoring for field reliability analysis with time-varying operating missions[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2015, 64(4): 1367-1382.
- [30] 刘震宇, 马小兵, 赵宇. 非恒定温度场合弹上性能退化型部件贮存可靠性评估[J]. 航空学报, 2012, 33(9): 1671-1678.
LIU Zhen-yu, MA Xiao-bing, ZHAO Yu. Storage reliability assessment for missile component with degradation failure mode in a temperature varying environment[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(9): 1671-1678.
- [31] Hong Y, Meeker W Q. Field-failure predictions based on failure-time data with dynamic covariate information[J]. *Technometrics*, 2013, 55(2): 135-149.
- [32] Animah I, Shafiee M. Condition assessment, remaining useful life prediction and life extension decision making for offshore oil and gas assets[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 53: 17-28.
- [33] Wang H W, Xi W J. Acceleration factor constant principle and the application under ADT [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2016, 32(7): 2591-2600.
- [34] 王浩伟, 滕克难, 奚文骏. 基于随机参数逆高斯过程的加速退化建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(9): 1843-1850.
WANG Hao-wei, TENG Ke-nan, XI Wen-jun. Accelerated degradation modeling method based on Inverse Gaussian processes with random parameters[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(9): 1843-1850.
- [35] Li X Y, Wu H, Ma H, et al. A random fuzzy accelerated degradation model and statistical analysis[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26(3): 1638-1650.
- [36] 王浩伟, 徐廷学, 王伟亚. 基于退化模型的失效机理一致性检验方法[J]. 航空学报, 2015, 36(3): 889-897.
WANG Hao-wei, XU Ting-xue, WANG Wei-ya. Test method of failure mechanism consistency based on degradation model[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(3): 889-897.
- [37] 王浩伟, 滕克难, 盖炳良. 基于加速因子不变原则的加速退化数据分析方法[J]. 电子学报, 2018, 46(3): 739-747.
WANG Hao-wei, TENG Ke-nan, GAI Bing-liang. The method of analyzing accelerated degradation data based on acceleration factor constant principle [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(3): 739-747.
- [38] Wang H W, Xu T X, Mi Q L. Lifetime prediction based on Gamma processes from accelerated degradation data [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(1): 172-179.
- [39] 周源, 王浩伟, 盖炳良. 加速退化模型及外推结果准确度的定量验证方法[J]. 航空学报, 2018, 39(9): 221950.
ZHOU Yuan, WANG Hao-wei, GAI Bing-liang. Quantitative validation methods for accelerated degradation model and extrapolated results[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(9): 221950.
- [40] Teng F, Wang H W, Zhou Y. Design of an optimal plan of accelerated degradation test via acceleration factor constant principle[J]. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 2018, 25(5): 1850021.
- [41] Wang H W, Teng K N, Zhou Y. Design an optimal accelerated-stress reliability acceptance test plan based on acceleration factor [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, 67(3): 1008-1018.
- [42] 王浩伟, 周源, 滕飞, 等. 基于加速因子不变原则的加速退化试验优化设计[J]. 机械工程学报, 2018, 54(18): 212-219.
WANG Hao-wei, ZHOU Yuan, TENG Fei. Optimal design of accelerated degradation test based on acceleration factor constant principle [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(18): 212-219.
- [43] 王浩伟, 滕克难. 基于加速退化数据的可靠性评估技术综述[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(12): 2877-2885.
WANG Hao-wei, TENG Ke-nan. Review of reliability evaluation technology based on accelerated degradation data [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(12): 2877-2885.
- [44] 国防科学技术工业委员会. GJB736.8-90: 火工品试验方法-71℃试验法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1991.
National defense commission for science, technology and industry. GJB736.8-90: Initiating explosive device method of the test at 71℃[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of the Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1991.
- [45] 国防科学技术工业委员会. GJB 736.13-91: 火工品试验方法-加速寿命试验-恒定温度应力试验法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1991.
National defense commission for science, technology and industry. GJB 736.13-91: Method of initiating explosive device test-Accelerated life test-Method of constant temperature stress [S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of the Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1991.
- [46] 中华人民共和国航空航天工业部. QJ 2328-92: 复合固体推进剂贮存老化试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
Ministry of aerospace industry of the People's Republic of China. QJ 2328-92: Test method for storage aging of composite solid propellants[S]. Beijing: China Standard Press, 1992.
- [47] ISO. ISO-11346: Rubber, vulcanized or thermoplastic-Estimation of life-time and maximum temperature of use[S]. ISO, 2014.
- [48] 中国人民解放军总装备部. GJB 5103-2004: 弹药元件加速寿命试验方法[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2004.
The general armaments department of the Chinese people's liberation army. GJB 5103-2004: Accelerated life test method for ammunition components[S]. Beijing: General Armaments Department, Military Standard Publishing and Distribution Department, 2004.
- [49] 中华人民共和国航空航天工业部. QJ2407-92: 电子元器件寿命和加速寿命试验数据处理方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
Ministry of aerospace industry of the People's Republic of China. QJ2407-92: Electronic component life and accelerated life test data processing method[S]. Beijing: China Standard Press, 1992.
- [50] 徐廷学, 王浩伟, 张磊. 恒定应力加速退化试验中避免伪寿命分布误指定的一种建模方法[J]. 兵工学报, 2014, 35(12): 2098-2103.
XU Ting-xue, WANG Hao-wei, ZHANG Lei. A reliability modeling approach to avoiding mis-specification of pseudo life distribution in CSADT [J]. *Acta Armamentar II*, 2014, 35(12): 2098-2103.

- [51] 侯海梅, 李久祥. 军用装备贮存延寿的主要途径[J]. 质量与可靠性, 2011(1): 24-26.
HOU Hai-mei, LI Jiu-xiang. The main way to extend the life of military equipment storage [J]. *Quality and Reliability*, 2011 (1): 24-26.
- [52] Radulescu M, Sandru V. Considerations about the life extension programs by technical resource renewal applied to the Surface-to-Air missiles [J]. *Scientific Research & Education in the Air Force-AFASES*, 2014, 1: 91-91.
- [53] 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]. *Missile and Space Vehicles*, 2012(1): 58-61.
- [54] Garg M, Tanim T R, Rahn C D, et al. Elevated temperature for life extension of lithiumion power cells [J]. *Energy*, 2018, 159: 716-723.
- [55] 张仕念, 吴勋, 易当祥, 等. 导弹贮存延寿的经济性模型[J]. 质量与可靠性, 2016 (5): 1-3.
ZHANG Shi-nian, WU Xun, YI Dang-xiang, et al. Economic model of missile storage life extension [J]. *Quality and Reliability*, 2016(5): 1-3.
- [56] Animah I, Shafiee M, Simms N, et al. Selection of the most suitable life extension strategy for ageing offshore assets using a life-cycle cost-benefit analysis approach [J]. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2018, 24(3): 311-330.
- [57] 关文, 关岭. A320飞机ESG延寿项目研究[J]. 民航学报, 2018, 2(1): 35-37.
GUAN Wen, GUAN Ling. Research on ESG life extension project of A320 [J]. *Journal of Civil Aviation*, 2018, 2(1): 35-37.
- [58] Shimizu M, Ishikawa T. Fatigue life extension of steel bridge by ICR treatment [J]. *Yosetsu Gakkai Shi/Journal of the Japan Welding Society*, 2018, 87(4): 252-256.
- [59] 张生鹏, 李宏民, 赵鹏飞. 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): 92-96.
ZHANG Sheng-peng, LI Hong-min, ZHAO Peng-fei. Accelerated testing technology system for storage life of missile equipment [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15 (2): 92-96.
- [60] Sun B, Feng Q, Zhao X, et al. Accelerated storage degradation test and life extension assessment method for hermetically sealed electromagnetic relay [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, ICQR2MSE, 2011: 336-341.
- [61] Sabbah W, Arabi F, Avino-salvado O, et al. Lifetime of power electronics interconnections in accelerated test conditions: High temperature storage and thermal cycling [J]. *Microelectronics Reliability*, 2017, 76-77: 444-449.
- [62] Zhao C J, Hong D P, Guan F, et al. Accelerated storage life test and assessment method for explosive initiator used on aircraft [J]. *Hanneng Cailiao/Chinese Journal of Energetic Materials*, 2015, 23: 1130-1134.
- [63] 申争光, 苑景春, 董静宇, 等. 弹上设备加速寿命试验中加速因子估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(8): 1948-1952.
SHENG Zheng-guang, YUAN Jing-chun, DONG Jing-yu, et al. Research on acceleration factor estimation method of accelerated life test of missile-borne equipment [J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2015, 37(8): 1948-1952.
- [64] Commission I E. IEC-62506: Methods for product accelerated testing [S]. IDT, 2013.
- [65] 中国人民解放军总装备部. 可靠性鉴定和验收试验: GJB 899A-2009 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2009.
The general armaments department of the Chinese people's liberation army. GJB 899A-2009: Reliability testing for qualification and production acceptance [S]. Beijing: general armaments department, military standard publishing and distribution department, 2004.
- [66] 张生, 王艺. 航空发动机受感部延寿试验方案研究[J]. 航空维修与工程, 2018 (1): 95-96.
ZHANG Sheng, WANG Yi. Study on the test scheme for prolonging the life of the turbine engine induction part [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2018 (1): 95-96.

Review on Key Technologies for Missile Storage and Life-Extension Test

WANG Hao-wei^{1,2}, TENG Ke-nan¹, LÜ Wei-min¹

(1. Collage of Coast Defence, Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. Yunnan Innovation Institute, Beihang University, Kunming 650233, China)

Abstract: Life-extension of missile is a systematic project with both military and economic benefits. As the domestic test on storage and life-extension is not scientific and systematic, it affects the effectiveness and efficiency of missile life-extension. This paper expounded the fundamental connotation of missile storage and life-extension test, summarized the main difficulties in storage and life-extension test, and proposed the basic flow of missile storage and life-extension test. The storage and life-extension test was divided into four parts: natural storage test, life extension test, accelerated storage test and validation test. The main research contents and research progress of each part were analyzed, and the key technologies such as storage life prediction based on natural storage test data, failure mechanism analysis and residual life prediction, overall planning for life-extension technical scheme, and accelerated storage test design based on actual service environment were summarized. Finally, the development trend and key research directions of storage and life-extension test technology were discussed. It has certain academic value and engineering guiding significance for promoting the technology development of missile storage and life-extension test.

Key words: missile; storage and life-extension; accelerated storage test; natural storage test; validation test

CLC number: TJ55; TB114.3

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019038

(责编:王艳秀)