

导弹贮存延寿的技术途径及关键技术

张仕念, 何敬东, 颜诗源, 张国彬, 易当祥

(北京市海淀区西北旺镇北清路109号203分队, 北京100094)

摘要: **目的** 分析导弹贮存延寿的技术途径和应突破的关键技术。**方法** 结合导弹贮存延寿的特点和难点,在分析美国、俄罗斯等国导弹贮存延寿主要做法的基础上,结合我国的技术差距,总结提出导弹贮存延寿的技术途径和关键技术。**结果** 导弹贮存延寿的技术途径是加速贮存试验、自然贮存试验、失效分析、性能改进相结合的基本方法。应重点突破的关键技术包括贮存寿命表征参数体系、贮存失效分析技术、加速贮存寿命试验方法、贮存寿命评估方法。**结论** 围绕选定的技术途径长期进行技术攻关,才能形成导弹贮存延寿的技术优势。

关键词: 导弹; 加速贮存寿命试验; 失效分析; 贮存延寿

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.04.008

中图分类号: TJ760.6; TJ410.89 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)04-0037-05

Basic Approaches and Key Techniques for Missile Storage Life Extension

ZHANG Shi-nian, HE Jing-dong, YAN Shi-yuan, ZHANG Guo-bin, YI Dang-xiang

(Division 203, 109 of Beiqinglu Road, Town of Xibeiwang, Haidian District, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: **Objective** Analysis was conducted concerning the basic approaches for missile storage life extension and key techniques awaiting breakthrough. **Methods** A comprehensive survey was made into the characteristics and difficulties of storage life extension, the major practices of the US and Russia in the field, and the techniques disparity between China and US or Russia in the field. **Results** The basic technical approaches to storage life extension were put forward, featuring an integration of accelerated storage test, natural storage test, failure analysis and performance upgrading. And the corresponding key techniques around the approaches, including storage life expressing parameters system, storage failure analysis techniques, accelerated storage life test techniques and storage life evaluation techniques were proposed. **Conclusion** Technical advantage of storage life extension could be formatted by long-term technology research around the selected approaches.

KEY WORDS: missile; accelerated storage life test; failure analysis; storage life extension

导弹贮存延寿是指通过对自然贮存件进行监测、开展加速贮存试验等方式,分析评估弹上仪器设备及导弹的贮存寿命,在此基础上采取更换短寿命

件、维修、嵌入式性能改进、放宽设计要求等技术措施,延长导弹的贮存寿命。导弹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

收稿日期: 2014-05-30; 修订日期: 2014-06-30

Received: 2014-05-30; Revised: 2014-06-30

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

Biography: ZHANG Shi-nian(1976—), Assistant researcher, Research focus: reliability and life extension technology.

大、长效工程。通过贮存延寿可以实现以较小的代价保持导弹的有效作战规模,科学合理地确定维修时机和维修内容,优化贮存使用方法,提高寿命设计水平。这对延长导弹的服役年限,提高导弹的贮存使用性能,减少武器装备购置经费,带动国家工业基础和科技水平的提升等都具有重要的意义^[1-2]。贮存延寿在航空导弹^[3]、信息化弹药^[4]等武器装备上也受到高度关注。

文中结合导弹贮存延寿的特点和难点,在分析美国、俄罗斯等国导弹贮存延寿主要做法的基础上,讨论导弹贮存延寿的基本技术途径,分析了围绕选定技术路线应该重点突破的关键技术。

1 导弹贮存延寿的特点

导弹贮存延寿主要研究导弹本身的贮存寿命问题、如何恢复导弹的状态问题和使用新技术改造旧装备即性能改进问题,主要具有以下特点。

1) 持续时间长、综合效益高。导弹贮存延寿研究涉及的基础学科专业多,专业面很广,跟踪监测、试验分析对国家的工业基础依赖很强,需要长期跟踪监测产品的性能变化情况,研究的时间往往很长,一般要持续十几年甚至数十年,如民兵导弹的延寿工作持续了50年。为了提高性能,各种新材料、新技术不断在导弹研制过程得到应用,新产品的研制不断带来新的贮存延寿问题,导弹贮存延寿是一项长期的研究任务。世界各国都竞相开展导弹贮存延寿工作,这是因为通过贮存延寿的研究,不仅可以回答导弹的贮存使用寿命问题,还能为长寿命导弹的设计奠定基础,并带动国家工业基础和科技水平的提升,综合效益非常高。

2) 分级试验、逐层验证。固体导弹贮存延寿技术的基本思路是“分级、分类、分步”开展试验:“分级”一般分为非金属材料及元器件、部组件及整机、舱段及整弹;“分类”一般分为装药类、结构类、机电类、电子类;“分步”一般采用先底层,后高层逐层递进的方式。总体上采用的是“金字塔”结构,底层是基础性试验,上一层级是下一层级的综合性、验证性试验。材料、器件级作为基础需要开展大量的试验;组件、整机级是关键,需要有足够的试验支撑;舱段、全弹级的贮存试验,是以整机以下大量试验为基础开展的综合性验证试验,是导弹贮存延寿试验不可或缺的。

3) 共性技术多,产品间可借鉴程度高。尽管各型导弹的组成结构差异很大,但开展贮存延寿研究涉及的技术是相似的,包括贮存失效分析技术、加速贮存试验技术、贮存寿命分析评估技术等。“一点突破,多方受益”的技术研发与管理模式具有很强的优势,导弹贮存延寿研究正逐步走向专业化发展的道路。由于导弹造价昂贵,就某一导弹而言,用于贮存试验的产品十分有限,部分产品甚至只有12件,是典型的小子样问题。通过分析不同导弹的结构组成,发现在非金属材料、电子元器件、电池、火工品等大量产品中,产品间的共用程度很高。还有部分产品,其工作原理、材料、制造工艺是相同或相近的,相互之间也可以借鉴。统筹考虑多型导弹的试验项目和试验件,解决单一产品试验件有限、不同产品之间试验项目一定程度上重复等问题,有利于实现统计评估,提高评估结果的准确性。

2 导弹贮存延寿的难点

导弹由大量机械、机电、电子、光电功能系统及设备整机组成,每一整机又由大量的元器件、非金属材料、各种结构等组成,产品构成复杂,每一环节都有可能失效。在贮存使用过程中,通常要经历运输、贮存、转载、值班、状态升级、作战演练、检查、测试、维护、保养、维修等事件,处于不同的环境条件之中,对导弹的寿命产生不同程度的影响,导致失效原因很多。导弹贮存延寿主要研究非工作状态下的寿命问题,部分弹上仪器在测试等过程中又处于工作状态,导致难以辨别导弹产品发生失效的原因和过程。贮存失效是一个非常缓慢过程,增加了研究的难度。导弹贮存延寿研究的主要难点包括以下几点。

1) 试验效率提高难。导弹贮存延寿主要研究产品在非工作状态下的寿命问题,由于非工作状态下的失效率一般要远远小于工作状态,研究工作可靠性的理论、方法在指导贮存延寿工作时,出现了新的问题,主要体现在试验效率很低。例如,要对首保期为50 000 km的汽车进行考核,按100 km/h计算,只需500 h,昼夜不停地行驶约需21天。要对贮存寿命为10年的导弹进行考核,采用自然贮存需要10年的贮存时间,对于产品管理、环境控制等都是一个挑战。采用加速寿命试验,据报道俄罗斯等效加速10年需要6个月时间,要求加速试验设备连续

工作6个月,对试验设备是一个巨大的挑战。

2) 老化过程监测难。导弹贮存延寿主要研究产品的老化问题,最直接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。国内尚未实现对老化过程进行实时监测,相关技术还处于研究阶段。由于缺乏有效的监测手段,目前国内普遍采用定期检测的方式研究贮存老化问题,美国早期也采用定期检测的方式。例如在民兵导弹的发动机监视计划中,贮存推进剂的批试样在0时和每隔18个月时做化学和物理实验;静态试车每隔6个月试车1台,共计39台发动机。

3) 失效判据制定难。弹上产品层次多样、种类繁多,每种产品贮存失效的表现形式多种多样,对其功能、性能的影响程度各不相同。不同层次产品贮存失效之间具有极为复杂的关系,上层产品的指标参数有时无法体现底层单元的参数变化。部分底层单元的性能参数变化,不仅对自身性能产生影响,还会影响上层产品的功能性能,同一产品的不同参数之间有时还具有相关性。弹上产品贮存失效数据积累有限,贮存失效的研究还处于起步阶段。以上因素导致找出可检测、可量化、相互独立的能够表征贮存失效的参数,并制定科学有效的失效判据难度很大。

3 导弹贮存延寿的基本途径

美国先后对民兵、三叉戟^[5-8]等导弹进行了延寿研究,特别是针对民兵导弹的延寿研究工作很具代表性,已经成为世界各国参照学习的典范。美国并不是给每种武器预先确定一个寿命期,然后放心大胆地使用,而是利用其先进的测试检测技术,主要依靠长期监测产品的贮存性能,辅以加速贮存试验,获取变化规律,建立外推模型预报寿命。通过持续进行性能改进保持技术优势,采取的延寿措施主要是更换、改进或者修理存在问题的部组件或有限寿命部组件。

俄罗斯先后对撒旦(SS-18)、匕首(SS-19)、白杨(SS-25)等导弹进行了延寿研究,积累类丰富的经验,形成了一套成熟的做法,具有鲜明的特点。俄罗斯基于扎实的基础数据和系统的寿命设计,利用加速贮存试验技术在研制阶段就能够给出一个较长的寿命评估值。进入使用阶段后,采用分段开展加速

贮存试验、结合训练发射进行试验验证的方法逐步延长导弹的贮存寿命,并结合延寿实施性能改进,确保战略核力量的稳定性和有效性。

综合比较美国和俄罗斯的导弹贮存延寿技术,其不同之处在于美国以贮存使用过程中的性能监测为主,通过外推预报寿命;俄罗斯以加速贮存试验为主快速预估寿命。其相似之处在于两国都重视寿命设计、试验验证和性能改进,且从全寿命周期来看,两国都采用分段试验的方式进行延寿,并没有一次给出导弹的最终寿命。

贮存试验方法主要有自然贮存试验和加速贮存试验2种途径。其中,自然贮存试验方法成熟、结论准确,但试验周期长。加速贮存试验的试验时间短、效率高,能够提前评估寿命,但不如自然贮存试验准确。随着加速贮存试验技术的发展完善,用该方法得出的寿命结论准确性正逐步提高^[9-10]。因此,长远看应该加快加速贮存试验方法的研究,走以加速贮存试验为主的预测导弹寿命之路,这是一条既经济又有效的技术途径。鉴于当前还没有系统掌握加速贮存试验技术的状况,可以以加速贮存试验为主提前给出贮存期的“评估值”,解决批量战斗弹整修所需的时间提前量问题,自然贮存试验产品到期后开展试验验证,给出“评定值”,弥补“评估值”不够准确的问题。

无论是美国还是俄罗斯,都进行了大量的失效分析工作。对于美国的模式,只有进行失效分析,才能建立外推模型提前预报寿命。对于俄罗斯的导弹贮存延寿模式,在开展加速贮存试验的过程中,只有失效机理保持不变,分析得出的结论才可信。无论是自然贮存试验还是加速贮存试验,对失效样品进行失效分析都是十分必要的,分析结果不仅可以用于改进试验方法、提高评估结果的准确性,同时也是开展长寿命导弹设计的重要基础。

导弹作为一种武器,是要用来作战的。战术技术性能是否具有优势,是判断一型导弹是否应该继续服役的基础。美国和俄罗斯为了保持技术优势,在延寿的过程中都进行了性能改进。特别是民兵导弹,预计服役时间会超过50年,根本原因在于美国持续对其进行性能改进。在开展导弹贮存延寿的过程中,也应注重性能改进,把最新技术嵌入老产品,通过整修把恢复状态与提高性能有机地结合起来,既要保持规模,又要提升作战能力,导弹贮存延寿才有生命力。

因此,根据导弹贮存延寿的总体需求,结合导弹的特点和我国现有技术水平,在借鉴美俄先进成熟的技术途径基础上,充分利用和发挥自身的特点优势,采取加速贮存试验、自然贮存试验、失效分析、性能改进相结合的导弹贮存延寿方法,逐渐形成具有我国特色的导弹贮存延寿技术途径:

1) 以加速贮存试验为主,进行适当外推,综合利用相关信息,提前3~5年给出贮存期的“评估值”,解决批量战斗弹整修所需的时间提前量问题。

2) 自然贮存试验产品到期后,开展地面试验和验证性飞行试验,以自然贮存试验为主给出贮存期的“评定值”,弥补加速贮存试验所给“评估值”的不够准确问题。

3) 重点针对自然贮存试验和加速贮存试验中的失效模式开展失效分析,解决自然贮存试验和加速贮存试验的针对性问题,为贮存寿命评估技术和试验技术优化提供支撑,为长寿命导弹设计奠定基础;

4) 根据同类产品的先进成熟技术,结合整修节点实施“嵌入式”性能改进、再制造,把恢复状态与提高性能有机地结合起来,既要保持规模,又要提升作战能力。

4 导弹贮存延寿的关键技术

为了更加科学合理地回答导弹的贮存使用寿命问题,系统带动我国工业水平的提升和科技基础研究的进步,围绕选定的技术途径,有重点地组织技术攻关,应突破以下关键技术。

1) 贮存寿命表征参数体系。贮存寿命表征参数体系,是指表征和判定导弹、分系统、整机、部组件、元器件、材料等弹上产品贮存寿命的参数体系,是判定弹上产品经过贮存后是否能够满足功能、性能要求的主要依据。在自然贮存试验、加速贮存试验、失效分析等研究过程中,都要对贮存寿命表征参数进行检测和分析。在研制过程中用于判断弹上产品功能、性能的设计参数中,部分参数与贮存时间有关,也有部分参数与贮存时间无关,还有些参数与贮存时间有关,但在产品研制过程中并没有作为设计参数考虑,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,成为制约导弹贮存延寿研究的瓶颈问题。逐步建立弹上产品的贮存寿命表征参数体系及其失效判据,并建立相应的测试检测手

段,是导弹贮存延寿研究最基础、最重要的研究内容。

2) 贮存失效分析技术。失效模式与机理,是指产品在正常和加速应力条件下怎样(失效模式)失效以及为什么(失效机理)失效。失效分析是通过每一失效模式、失效机理的分析,包括细观/微观结构、机械失效过程、化学失效过程、热退化过程等内在原因的分析,找出产品失效的内在原因。只有通过失效分析,建立加速贮存试验和自然贮存试验之间的相关性,才能保证寿命评估结果的可信度。经过多年的积累,部分弹上产品的贮存失效模式已相对清楚,然而对其贮存失效机理的研究很少。由于进行失效模式与机理分析通常要用构成产品各种材料的原子、分子间组成形态的变化来加以阐明或解释,并力求与产品的设计、制造和使用过程联系起来,研究过程中对先进测试检测设备的依赖程度很高,研究难度很大。

3) 加速贮存寿命试验方法。加速贮存寿命试验方法是指在不改变失效机理的前提下,通过加大应力的方式加快产品的失效,通过计算得出正常应力水平下贮存寿命的一种试验方法。包括理论模型、加速环境(应力)模拟方法、检测鉴定方法、试验中的安全性、方法的验证等内容,是提前评估弹上产品贮存寿命的必须试验手段与技术途径。

国内针对加速贮存试验方法开展了大量的研究^[11-13],基本掌握了非金属材料、电子元器件的加速贮存试验方法,尚未开展过平台、伺服机构等典型机电产品和弹上计算机、配电器等典型电子产品整机级的加速贮存寿命试验。固体发动机、弹头等典型含能产品,由于具有燃烧和爆炸的潜在危险,试验过程中的安全性特别值得关注,其加速贮存寿命试验基本还是空白。整机级、全弹级加速贮存寿命试验的理论、方法、技术还不成熟,很多关键技术还没有取得突破。

4) 贮存寿命评估方法。贮存寿命评估是导弹贮存延寿的决策依据,评估方法科学与否,直接影响并决定了评估结论的准确程度和可信程度,同时对试验方案的设计也具有牵引和杠杆作用。用于指导导弹贮存期评估的是GJB 3105—97 战略导弹系统性能评定方法,经过10余年的使用表明,按照该标准来预测导弹的贮存寿命存在很多困难。例如对部分产品的贮存寿命评估结果与工程实际差距较大,该标准中的系统综合方法还仅限于指数型数据的系

统综合,而工程实践中还有诸如正态分布、威布尔分布等其它分布类型。同时,当前的贮存寿命评估方法主要是统计分析方法^[14-17],还需要与失效模型和贮存寿命表征指标体系有机结合起来,有很大的改进空间,长期贮存对工作可靠性的影响有多大、如何分析计算等问题,也需要研究。

可见,加速贮存试验方法基于失效模式与机理,并以贮存寿命表征参数体系作为观测、判别对象,贮存寿命评估方法以失效模型和贮存寿命表征参数体系为基础,根据贮存试验获取的数据评估产品的贮存寿命。对于同一产品而言,贮存寿命表征参数体系、失效模式与机理、贮存试验方法和贮存寿命评估方法相互关联、相互验证,相互之间是闭环的逻辑关系,都是导弹贮存延寿研究的重要内容,也是贮存延寿研究的核心和关键。

5 结语

导弹贮存延寿工作持续时间长达数十年,在这期间出现的经济波动、人员更替、管理转变、技术进步等,都会影响这项工作的顺利实施,为有效管理和经费持续投入增加了难度。导弹贮存延寿只有围绕选定的技术途径组织技术攻关,靠体制、制度进行保障,才能系统运行、长期投入研究,更加科学合理地回答导弹的贮存使用寿命问题。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.
MENG Tao, ZHANG Shi-nian. Review of Missile Weapon Storage Life Extending [J]. Technological Research, 2009,25(1):10—13.

[3] 王春晖,李忠东,张生鹏.航空导弹贮存期寿命分析[J].装备环境工程,2011,8(4):68—72.
WANG Chun-hui, LI Zhong-dong, ZHANG Sheng-peng. Storage Life Analysis of Aircraft Missile [J]. Equipment

Environmental Engineering, 2011, 8(4):68—72.

[4] 牛跃听,穆希辉.信息化弹药贮存寿命评估研究展望[J].装备环境工程,2013,10(5):94—101.
NIU Yue-ting, MU Xi-hui. Research Prospect of Information Ammunition Storage Life Evaluation [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5):94—101.

[5] 张宗美.民兵洲际弹道导弹[M].北京:宇航出版社,1985.
ZHANG Zong-mei. Minuteman, the Intercontinental Ballistic Missile [M]. Beijing: The Aeronautics Press, 1985.

[6] 罗天元,周堃,余淑华,等.国外弹药贮存寿命试验与评价技术概述[J].装备环境工程,2005,2(4):17—22.
LUO Tian-yuan, ZHOU Kun, YU Shu-hua, et al. Summarization on Foreign Ammunition Storage Life Test and Evaluation Technology [J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(4):17—22.

[7] 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. An Overview to the US Minuteman 3 and Trident 2 Missile Improvement Projects [J]. Aerospace China, 2011(3):35—37.

[8] 周堃,罗天元,张伦武.弹箭贮存寿命预测预报技术综述[J].装备环境工程,2005,2(2):6—11.
ZHOU Kun, LUO Tian-yuan, ZHANG Lun-wu. Prediction Techniques for Storage Life of Missiles [J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(2):6—11.

[9] NELLSON W B. Accelerated Life Testing-step-stress Models and Data Analysis [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1980, 29(2):103—108.

[10] RIVALINO M J, PEDRO A B, KISHOR S T. Accelerated Degradation Tests Applied to Software Aging Experiments [J]. IEEE Trans on Reliability, 2010, 59(1):102—114.

[11] 郝冲,许路铁,吕帅.加速寿命试验技术在弹药贮存可靠性工程中的应用[J].装备环境工程,2012,9(5):48—51.
HAO Chong, XU Lu-tie, LYU Shuai. Application of Accelerated Life Testing Technology in Storage Reliability Engineering [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5):48—51.

[12] 汪亚顺,莫永强,张春华,等.双应力步进加速退化试验统计分析研究-模型与方法[J].兵工学报,2009,30(4):451—456.
WANG Ya-shun, MO Yong-qiang, ZHANG Chun-hua, et al. Study on Statistical Analysis for Step-stress Accelerated Degradation Tests with Two Accelerating Stresses-Models and Methods [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(4):451—456.

定温度应力试验法[S].

GJB 736.13—1991, Method of Initiating Explosive Device Test-Accelerated Life Test Constant Temperature Stress Test Method[S].

[12] WANG W, KECECIOGLU B. Fitting the Weibull Log Linear Model to Accelerated Life Test Data[J]. IEEE Transaction on Reliability, 2000, 49(2): 217—223.

[13] YEO K P, TANG L C. Planning Step Stress Life Test with a Target Acceleration Factor[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48(1): 61—67.

[14] CRK V. Reliability Assessment from Degradation Data [C]//Proc Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2000. (余不详)

[15] NELSON W. Analysis of Performance Degradation Data

from Accelerated Tests[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1981, 30: 149—155.

[16] 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.

LI Jiu-xiang. Research on Accelerated Storage Life Testing for Complete Products[J]. Quality and Reliability, 2004(4): 14—17.

[17] 陈海建, 李波, 顾钧元, 等. 基于加速寿命试验的导弹寿命预估方法[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(4): 11—12, 24.

CHEN Hai-jian, LI Bo, GU Jun-yuan, et al. The Prediction Method of the Missile's Life Based on Accelerated Life Testing[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010, 31(4): 11—12, 24.

(上接第 25 页)

[3] 黄瑞松. 飞航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, 2002.

HUANG Rui-song. The Storage Reliability Analysis of Cruise Missile[M]. Beijing: NO. 3 Institute of China Aerospace of Science and Industry Corp, 2002.

[4] 牛跃听, 穆希辉, 姜志保. 某型火箭弹控制舱环境适应性研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 86—92.

NIU Yue-ting, MU Xi-hui, JIANG Zhi-bao. Research on Environmental Adaptability of a Guided Rocket [J]. Equipment Environmental Engineer, 2014, 11(1): 86—92.

[5] 奚愚生, 张燕, 李继红, 等. 非金属弹药筒环境适应性研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 98—100.

XI Yu-sheng, ZHANG Yan, LI Ji-hong et al. On Environmental Worthiness of Non-metallic Cartridge Case[J]. Equipment Environmental Engineer, 2012, 9(4): 98—100.

[6] 赵保平, 张韬. 系统级产品环境试验与评估若干问题探讨[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 54—62.

ZHAO Bao-ping, ZHANG Tao. On Environmental Test and Evaluation of System Grade Products[J]. Equipment Environmental Engineer, 2012, 9(6): 54—62.

[7] 马丽娥. 舰船武器装备环境适应性研究与分析[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(2): 26—30.

MA Li-e. Research and Analysis of Ship Weapon Equipment Suitability of Environment [J]. Ship Science and Technology, 2006, 28(2): 26—30.

(上接第 41 页)

[13] 谭源源, 张春华, 陈循. 竞争失效场合步进应力加速试验统计分析[J]. 航空学报, 2011, 32(3): 429—437.

TAN Yuan-yuan, ZHANG Chun-hua, CHEN Xun. Analysis of Step Stress Accelerated Testing with Competing Failure Modes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(3): 429—437.

[14] 童雨, 李晓钢. 导弹贮存可靠性预测模型[J]. 装备环境工程, 2005, 2(5): 42—50.

TONG Yu, LI Xiao-gang. Introduction of Storage Reliability Prediction Models for Missiles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(5): 42—50.

[15] 张仕念, 孟涛, 张国彬, 等. 成败型串联系统可靠性近似置信限综合方法比较[C]. 数理统计与管理-首届贮存延寿论坛论文集, 2012.

ZHANG Shi-nian, MENG Tao, ZHANG Guo-bin. Compari-

son of Pass-fail Series System Reliability Approximate Lower Confidence Limits Synthesis Method[C]. Journal of Applied Statistics and Management-Proceedings of the First Conference on Storage Life Extending, 2012.

[16] 马小兵, 王晋忠, 赵宇. 基于伪寿命分布的退化数据可靠性评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 228—232.

MA Xiao-bing, WANG Jin-zhong, ZHAO Yu. Reliability Assessment Using Constant-stress Accelerated Degradation Data Based on Pseudo Life Distribution[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(1): 228—232.

[17] PENG C Y, TSENG S T. Mis-specification Analysis of Linear Degradation Models [J]. IEEE Trans On Reliability, 2009, 58(3): 444—455.