

武器装备

鱼水雷延寿策略与试验技术探讨

郭勍, 何光进

(海军装备部驻广州地区军事代表局, 广州 510320)

摘要: 针对水中兵器达到规定的贮存期后, 如何对状态进行再评估, 并通过维修、换件等手段延长装备服役年限, 进一步发挥装备效益, 通过阐述水中兵器延寿研究现状, 详细分析了高温、低温和交变温度等因素对产品组成材料的影响及失效机理。在此基础上, 以鱼雷为例, 提出了贮存寿命加速试验设计流程, 综合考核多种因素, 确定贮存寿命加速试验的应力类型、全雷温度加速因子、温度加速试验应力和加速试验时间, 建立了试验流程图。按照确定后的相关要素, 制定了试验方案, 明确了贮存失效和贮存寿命终止判据。综合记录数据、失效判定和试验情况, 提出了试验结论和改进意见, 为装备定寿指标确认和延寿措施制定提供依据支撑。

关键词: 水中兵器; 可靠性; 延寿; 加速试验; 贮存; 失效

中图分类号: TJ631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2021)12-0001-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.12.001

Discussion on Life Extension Strategy and Test Technology of Torpedo and Mine

GUO Qing, HE Guang-jin

(Military Representative Bureau of the Naval Equipment Department in Guangzhou, Guangzhou 510320, China)

ABSTRACT: When the underwater weapon reaches the specified storage period, how to reevaluate the status and extend the service life by means of maintenance and replacement, further play the benefits of equipment. This paper expounds the research status of life extension of underwater weapons firstly, then the effects of high temperature, low temperature and alternating temperature on the product composition and failure mechanism were analyzed in detail. On this basis, taking torpedo as an example, the design flow chart of storage life accelerated test is put forward. Various factors is evaluated comprehensively to determine the stress type of accelerated storage life test, torpedo temperature acceleration factor, temperature accelerated test stress and accelerated test time, then, the flow chart of storage accelerated life test is established. The test scheme shall be formulated according to the determined relevant elements to clarify the storage failure and storage life termination criteria. The record data, failure judgment and test conditions are comprehensively recorded, and the test conclusions and improvement suggestions are put forward, which provides basis support for equipment life determination index confirmation and life extension measures formulation.

收稿日期: 2021-09-12; 修订日期: 2021-10-27

Received: 2021-09-12; Revised: 2021-10-27

基金项目: 军队装备综合研究项目 (HJ20172A05387)

Fund: Comprehensive Research Project of Military Equipment(HJ20172A05387)

作者简介: 郭勍 (1978—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为武器装备质量监督/合同监管。

Biography: GUO Qing (1978—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: quality supervision of weapons and equipment/contract supervision.

通讯作者: 何光进 (1983—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向武器装备质量监督/合同监管。

Corresponding author: HE Guang-jin (1983—), Male, Doctor, Engineer, Research focus: quality supervision of weapons and equipment/contract supervision.

引文格式: 郭勍, 何光进. 鱼水雷延寿策略与试验技术探讨[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 001-006.

GUO Qing, HE Guang-jin. Discussion on life extension strategy and test technology of torpedo and mine[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(12): 001-006.

KEY WORDS: underwater weapon; reliability; life extension; accelerated test; storage; failure

鱼水雷等水中兵器作为“平时长期贮存、战时一次使用”的重要武器装备，其服役期限直接关系到部队战斗力保持和装备全寿命周期成本。特别是超期服役阶段，可靠性问题频发，对装备贮存和使用安全带来诸多隐患。若到寿后直接报废，则会造成资源浪费，增加装备更新替换压力。为此，开展水中兵器延寿策略研究，借助相关试验技术，准确评估其寿命，尽可能延长装备使用期限，对保持部队战斗力，节省国防建设成本具有重要的军事意义和经济价值^[1-7]。文中通过阐述水中兵器延寿研究现状，在分析装备寿命影响因素的基础上，重点就结合加速试验开展评估的技术途径进行探讨，提出流程规划和实施方法，以期对水中兵器乃至其他装备延寿技术发展提供借鉴参考。

1 水中兵器延寿研究现状

我国武器装备的寿命评估研究工作起步较晚，直到20世纪70年代，大多数装备也仅有“质量保证期”的规定。20世纪80年代，国内开始提出“保险期”概念，“保险期”是指“把装备出厂之日作为计时起点，在规定的保管、维护和使用条件下，与一个较高的可靠性指标相对应的寿命时间”。20世纪90年代，“贮存寿命”或“贮存期”的概念才逐渐成熟。近年来，国内相关机构开展了火工品和火炸药的相容性及贮存研究^[8-12]，制式炮弹^[13]、航空弹药贮存寿命研究^[14-15]，导弹延寿研究及元器件专项贮存延寿共性技术研究等工作^[16-25]，获得了大量元器件、材料级贮存寿命数据，形成了一些寿命与可靠性评估方法、

模型，积累了一定的理论成果和工程经验^[26-35]。

对于水中兵器行业，装备寿命考核通常是结合相似产品寿命比对，利用相关贮存试验和理论分析数据进行综合评估，缺乏专门的试验考核验证手段，装备延寿技术储备薄弱，设计方法、手段缺乏。主要表现在：缺少材料和元器件等基础寿命数据，特别是实际装载期间高温、高湿、高盐雾环境下的寿命数据尤为缺乏；缺少可靠性设计分析手段，如装载可靠性、贮存可靠性等指标几乎全依靠理论分析得出，仅小部分经过试验验证，难以掌握装备真实性能水平；缺少系统寿命评估模型，由于加速模型的加速因子具有一定误差，需考虑加速寿命、基于贮存信息的寿命评估结果以及零部件级的寿命评估数据来综合评价产品寿命，而目前尚缺乏相应的评估模型和方法；缺少贮存加速寿命试验技术，装备加速寿命模型与其任务使命和寿命周期内所经历的环境特性密切相关，而目前未能根据其结构特征、经历的关键环境条件、存在的主要失效模式提出加速寿命评价模型；尚未建立延寿技术体系，目前水中兵器寿命评价和延寿技术未形成标准化体系，有待借鉴航空领域装备贮存延寿经验，结合自身行业特点，进一步研究形成技术规范。

2 水中兵器寿命影响因素

水中兵器寿命剖面从交付服役开始到战斗发射或退役报废终止。以鱼雷为例，根据不同使用方式下的任务过程分析，其寿命周期内经历的主要事件如图1所示。

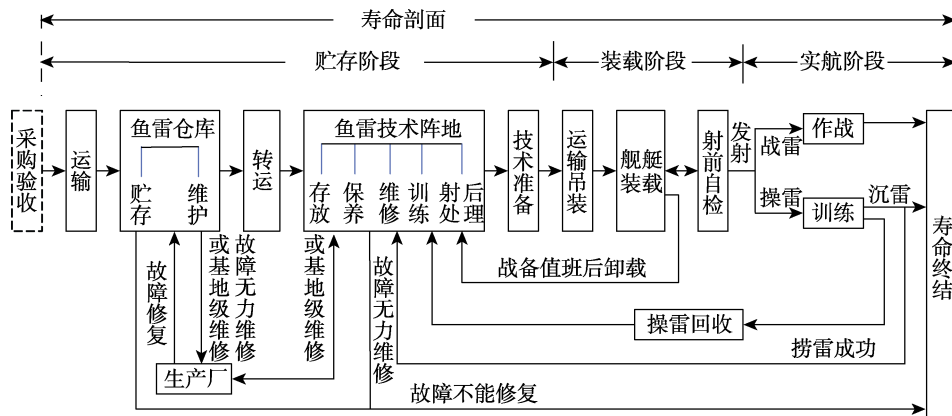


图1 鱼雷寿命剖面 Fig.1 Torpedo life profile

根据上述鱼雷寿命剖面，其在运输、贮存、装载、实航等寿命期内，可能遇到或产生的自然环境和诱发环境应力，具体见表1。

通常鱼水雷等水中兵器是“长期贮存、一次使用”的产品，故影响水中兵器寿命的主要环境因素是其贮

存期间经历的温度、湿度、霉菌、盐雾等。由于鱼水雷等水中兵器装备通常以充干燥氮气的包装箱贮存，箱内湿度、霉菌、盐雾对寿命影响较小，故温度成为影响寿命的主要环境因素，具体分为高温、低温和交变温度3种条件模式。

表 1 鱼雷在寿命剖面内经历的环境应力分析
Tab.1 List of environmental stress analysis of torpedo life profile

任务阶段	典型状态	环境条件
运输	公路、铁路运输及技术阵地转移	温度、湿度、振动、冲击、跌落、霉菌、盐雾等
贮存	库房或技术阵地	温度、湿度、霉菌、盐雾等
装载	雷库、备雷架装载	温度、湿度、振动、冲击、霉菌、盐雾等
	发射管内装载	温度、湿度、振动、冲击、霉菌、盐雾、海水腐蚀等
实航	发射	温度、湿度、振动、冲击等
	水下航行	温度、湿度、振动、冲击、海水压力、海流、海况等

1) 高温主要体现在对产品组成材料的影响，其失效机理为：随着温度增加，电子、原子和分子运动速度加快，激发了热力效应、电磁效应等，促使产品提前失效。具体包括：加速非金属材料老化、氧化、黏度下降，造成密封失效；造成电连接器绝缘或导电性破坏，导致连接器失效；随着温度升高，电缆/导线绝缘体变软，抗剪强度降低，被挤压后可能发生塑性变形，直至导体外露而造成短路；电器开关触点和接地之间的绝缘电阻随温度升高而降低，且高温条件下触点和开关机构的腐蚀速度加快，以及引起舵机绕组绝缘失效。此外，高温还可能促进其他环境因素对产品产生不利影响，如提高湿气的浸透速度，增大盐雾所造成腐蚀的速度等。

2) 低温也主要体现为对产品组成材料的影响，其失效机理为：在低温条件下，电子、原子和分子运动速度减小，导致材料脆化，强度降低，产生龟裂和硬化等，促使产品提前失效。具体包括：微电路因热膨胀系数差异形成的应力激化材料裂纹、孔隙，导致机械断裂、接头断开；暴露于低温下的电器开关材料收缩，出现裂纹，导致湿气或其他外界污染物进入开关，造成短路、电压击穿或电晕；电连接器金属和非金属材料以不同速率变脆和收缩，致使密封带开绽；低温条件下导线或电缆受到剧烈弯曲或冲击，引发绝缘体破裂；长时间低温促使油脂类材料黏度增加和状态固化，润滑性能下降。此外，低温也可能促进其他环境因素对产品产生不利影响，如造成湿气汽凝、霜冻和结冰，低温和低气压组合进一步加速密封处漏气等。

3) 交变温度下材料出现不同程度的膨胀或收缩，在产品结构内部引起复杂应力，特别是温度循环引起周期性机械应力和不同材料热膨胀不匹配引起热循环内应力，均容易导致产品性能下降及器件疲劳失效。具体表现为：玻璃容器和光学仪器碎裂，运动部件卡紧或松弛，密封件漏气漏液，电路失效，继电器电位计接插件接触不良老化；微电路因热膨胀系数差异形成的应力激化材料裂纹、孔隙等。

3 水中兵器延寿策略与试验技术

水中兵器延寿策略主要包括：在研制阶段合理确

定装备的贮存寿命，实现服役期内较高的战备完好率；在贮存寿命末期对装备使用状态进行再评估，并通过维修、换件等手段延长装备的服役年限，充分发挥装备的使用效益。为此，模拟真实贮存环境条件，施加相关应力进行试验验证，准确提出装备寿命指标数据和延寿评估结论，是成功实现装备延寿目标的重要基础性工作。由于在实验室内开展额定应力下的水中兵器寿命试验，周期和成本在工程中均难以接受，而加速试验以其时间短、效率高等特点，为水中兵器寿命快速评估提供了一种易实施、可实现的技术解决途径。

加速试验是在进行合理工程及统计假设的基础上，利用与物理失效规律相关的统计模型对加速条件下获得的数据进行转换，得到正常应力水平下装备寿命特征的试验方法。水中兵器贮存寿命加速试验设计工作主要包括试验剖面应力种类、加速试验应力和试验应力水平等 3 个方面，在保证产品的主要故障模式和故障机理不发生变化的情况下，应选取尽可能高的加速应力，以缩短试验时间，提高评估费效比。仍以鱼雷为例，典型加速试验设计流程如图 2 所示。

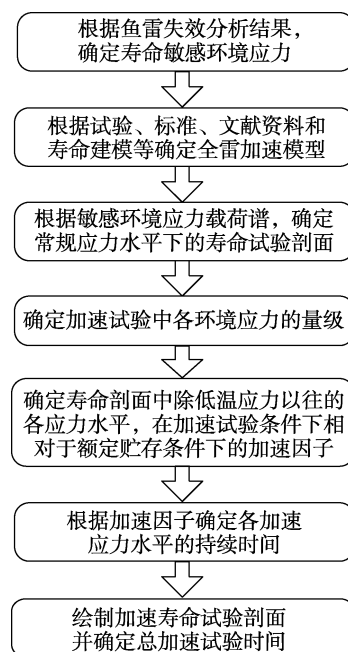


图 2 鱼雷贮存寿命加速试验设计流程
Fig.2 Design flow chart of torpedo storage life accelerated test

具体设计方法如下。

1) 确定应力类型。根据鱼雷贮存寿命影响因素分析,选择温度作为加速贮存寿命的应力类型。

2) 确定加速模型。将温度作为敏感环境应力,选取阿伦尼斯模型,采用金字塔式的加速试验建模技术,充分利用元器件级、材料级的激活能 E_a 信息,采用基于应力分析与阿伦尼斯模型相结合的方法自下而上构建元器件/材料级-部件级-全雷级温度加速因子转化模型,最终确定鱼雷整机装备温度加速模型。首先,梳理组成全雷的所有元器件清单,采用基于应力分析的方法,确定各元器件在额定应力条件下的失效率。其次,根据收集到的各个元器件的激活能,利用阿伦尼斯模型和基于应力分析的方法评估出各元器件加速应力相对于额定应力的加速因子 A_F ,用正常应力下的失效率与各自的加速因子相乘,得出各元器件在加速应力下的失效率。各类器件的激活能可以根据 GB/T 34986—2017《产品加速试验方法》、IEC61709、IEC62380 等标准及元器件试验值和相关文献获取。最后,通过贮存可靠性建模的方式,分别计算出全雷在额定应力和加速应力下的失效率,两者之比作为全雷温度加速因子 A_F 。

3) 确定应力量值。根据鱼雷贮存敏感环境应力分析结果,结合鱼雷的实际贮存环境条件、鱼雷包装和产品密封性等特点,确定鱼雷贮存的主要环境应力为温度应力。考虑到仓库内实际温度变化不大 (20 ± 3) $^{\circ}\text{C}$,故贮存加速试验采用恒温应力作为加速试验应力。根据阿伦尼斯模型,贮存温度试验应力越高,加速因子越大,时间越短,但试验应力过高会改变产品的失效机理。故应在综合考虑鱼雷的设计特点、电路板和元器件、原材料和辅料的耐环境应力范围等3个主要因素的基础上,基于可靠性强化试验结果和工程经验,确定全雷的温度加速试验应力。

4) 确定加速试验时间。根据鱼雷贮存寿命的评价目标和加速因子,确定贮存加速寿命试验时间。

明确试验应力、加速因子、试验时间后,按图3所示的试验流程开展贮存加速寿命试验。

按照试验设计流程,并确定相关要素后,制定试验方案,明确被试品、操作实施、测试测量、试验暂停、中断、恢复和终止等若干要求。试验过程中,凡因零部件、元器件、材料件出现明显的氧化、腐蚀、老化等耗损性特征,造成被试品故障,应判定为贮存失效。只有由于贮存环境引起产品出现耗损性故障,且该故障修复复杂,甚至无法修复时,才作为试验产品贮存寿命终止的判据。试验结束后,应综合记录数据、失效判定,以及试验完成或终止情况,提出试验结论和改进意见,为装备定寿指标确认和延寿措施制定提供依据支撑。

为积极推动上述试验流程方法的工程实践运用,近年来国内有关单位结合某型到寿水中兵器装备延

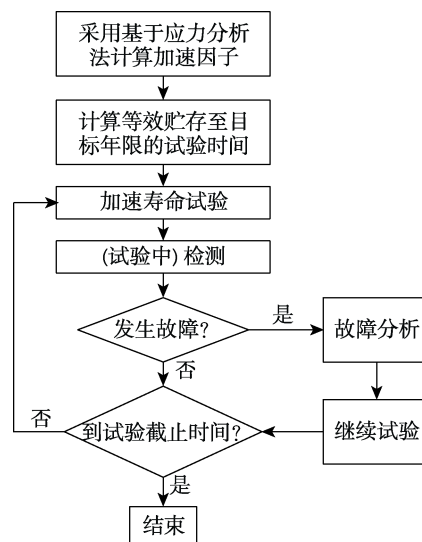


图3 贮存加速寿命试验流程

Fig.3 Flow chart of storage accelerated life test

寿项目进行了试点验证。通过对加速试验及分析评估发现的6个方面产品薄弱环节进行综合改进提升,该型装备贮存寿命获得了大幅增长,以较短的时间和较低的成本有效延长了服役期限。

4 结语

文中以鱼水雷延寿为背景,在分析装备寿命影响因素的基础上,开展了鱼水雷延寿策略研究。重点就结合加速试验开展评估的技术途径进行了探讨,提出了流程规划和实施方法,并结合某型到寿鱼雷装备延寿项目进行了试点验证。该研究对水中兵器乃至其他装备延寿技术发展提供了借鉴参考,具有良好的工程推广价值。

参考文献:

- [1] 黄凤军,赵晋宏,张骏虎.开展水中兵器战斗部延寿技术研究的探讨[J].鱼雷技术,2012,20(6):463-466.
HUANG Feng-jun, ZHAO Jin-hong, ZHANG Jun-hu. Discuss on prolonging service-life for underwater weapon warhead[J]. Torpedo technology, 2012, 20(6): 463-466.
- [2] 谢勇,朱文振,高江,等.水中兵器延寿后的战术性能指标评估[J].舰船电子工程,2017,37(1):96-99.
XIE Yong, ZHU Wen-zhen, GAO Jiang, et al. Evaluation method of underwater weapon's tactical performance indices after life extension[J]. Ship electronic engineering, 2017, 37(1): 96-99.
- [3] 张洪刚,李玉江,谢勇.水中兵器延寿样本的装载可靠度鉴定试验方案[J].海军工程大学学报,2014,26(5):102-106.
ZHANG Hong-gang, LI Yu-jiang, XIE Yong. Loading reliability of demonstration test scheme for extended-life specimen underwater weapons[J]. Journal of Naval Uni-

- versity of Engineering, 2014, 26(5): 102-106.
- [4] 谢勇, 苑秉成, 李恒. 水中兵器延寿样本的实航可靠度鉴定试验方案研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(4): 869-873.
XIE Yong, YUAN Bing-cheng, LI Heng. Designing a underwater weapon's working reliability demonstration test scheme after extended life[J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2014, 38(4): 869-873.
- [5] 吴诗辉, 刘晓东, 郭亚坤, 等. 装备经济寿命的一般规律研究[J]. 装备学院学报, 2016, 27(3): 63-68.
WU Shi-hui, LIU Xiao-dong, GUO Ya-kun, et al. Research on general rules of economic life for weapons and equipments[J]. Journal of Equipment Academy, 2016, 27(3): 63-68.
- [6] 包赓民, 李广峰. 武器装备的寿命周期费用思想[J]. 装备制造技术, 2017(3): 214-216.
BAO Zhen-min, LI Guang-feng. Equipment life cycle cost[J]. Equipment manufacturing technology, 2017(3): 214-216.
- [7] 仲维彬, 陈欢, 梁志君. 鱼雷延寿试验及寿命评估方法[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(3): 193-197.
ZHONG Wei-bin, CHEN Huan, LIANG Zhi-jun. Methods of life prolonged test and life assessment for torpedo[J]. Journal of unmanned undersea systems, 2017, 25(3): 193-197.
- [8] 朱蕾, 余淑华, 罗天元. 点火药贮存相容性研究[J]. 火工品, 2007(1): 18-20.
ZHU Lei, YU Shu-hua, LUO Tian-yuan. Study on storage compatibility of ignition powder[J]. Initiators & pyrotechnics, 2007(1): 18-20.
- [9] 李静, 姚朴, 侯毓悌, 等. 火工品药剂相容性问题的探讨[J]. 火工品, 2001(2): 45-48.
LI Jing, YAO Pu, HOU Yu-di, et al. Discussion of compatibility on loading materials for initiating explosive device[J]. Initiators & pyrotechnics, 2001(2): 45-48.
- [10] 张卫东. 火工品药剂相容性(VST法)新评价标准[J]. 火工品, 1994(3): 19-22.
ZHANG Wei-dong. A new evaluation standard on compatibility of loading materials for initiating explosive device[J]. Initiators & pyrotechnics, 1994(3): 19-22.
- [11] 高大元, 张孝仪, 李广来, 等. 热固炸药相容性表现与机理研究[J]. 中国核科技报告, 1998(S6): 212-228.
GAO Da-yuan, ZHANG Xiao-yi, LI Guang-lai, et al. Study on compatibility and mechanism of thermoset explosive[J]. China nuclear science and technology report, 1998(S6): 212-228.
- [12] 娄建, 肖剑伟. 弹药设计中的炸药相容性问题[J]. 工兵装备研究, 2008, 27(5): 22-24.
LOU Jian, XIAO Jian-wei. The problems for explosive compatibility in ammunition design[J]. Engineer equipment research, 2008, 27(5): 22-24.
- [13] 徐进欣, 王金柱, 范志锋. 某型末制导炮弹控制舱贮存加速寿命试验应力研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 88-91.
XU Jin-xin, WANG Jin-zhu, FAN Zhi-feng. Study on accelerated storage life testing stress of control-capsule of terminally guided projectile[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(5): 88-91.
- [14] 祝逢春, 王晓鸣, 崔大伟, 等. 航空弹药可靠贮存寿命评定方法[J]. 弹道学报, 2007, 19(1): 68-71.
ZHU Feng-chun, WANG Xiao-ming, CUI Da-wei, et al. An evaluation method of reliable stockpile lifetime of air ammunitions[J]. Journal of ballistics, 2007, 19(1): 68-71.
- [15] 薛敏, 赵建忠, 席建峰, 等. 精确制导弹药延寿阶段贮存可靠性预测模型研究[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(3): 120-123.
XUE Min, ZHAO Jian-zhong, XI Jian-feng, et al. Study on prediction model of storage reliability at life prolonging stage of precision guided ammunitions[J]. Ship electronic engineering, 2020, 40(3): 120-123.
- [16] 杨少华, 李坤兰. 光电耦合器的长期贮存退化特性分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2013, 31(1): 27-30.
YANG Shao-hua, LI Kun-lan. The Long-term storage degradation characteristics of Opto-coupler[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2013, 31(1): 27-30.
- [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] 李根成, 陈智芳. 空空导弹定延寿技术应用研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(5): 90-92.
LI Gen-cheng, CHEN Zhi-fang. Application study of life estimation and prolongation technique for air-to-air missile[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(5): 90-92.
- [19] 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, 8.
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, 8.
- [20] 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, 2019, 27(12): 1004-1016.
- [21] 马凌, 李俊, 赵韶平, 等. 面向导弹贮存延寿的 PHM 技术研究与工程应用[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 42-48.
MA Ling, LI Jun, ZHAO Shao-ping, et al. PHM technique studies and engineering applications faced to missile storage and life extension[J]. Equipment environmental engineering, 2014, 11(4): 42-48.

- [22] 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.
- [23] 许学春, 刘鸿雁. 对超期导弹工程延寿技术的评定[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(3): 336-338.
XU Xue-chun, LIU Hong-yan. Assessment to the technology of prolonging life in engineering for extended-active-duty missile[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2008, 23(3): 336-338.
- [24] 张仕念, 颜诗源, 张国彬, 等. 基于能执行任务率的导弹武器装备贮存寿命综合评估方法[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(2): 513-520.
ZHANG Shi-nian, YAN Shi-yuan, ZHANG Guo-bin, et al. Storage life synthesis evaluation method of guided missile weapon based on mission capable rate[J]. Systems engineering-theory & practice, 2015, 35(2): 513-520.
- [25] 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): 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.
- [26] 李道航, 吴学雷, 万芳, 等. 综合考虑疲劳强度影响因素的寿命预测方法[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 109-115.
LI Dao-hang, WU Xue-lei, WAN Fang, et al. Life prediction method synthetically considering the influence factors of fatigue strength[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(7): 109-115.
- [27] 秦强, 张生鹏. 综合环境条件下电子装备贮存寿命加速试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 81-87.
QIN Qiang, ZHANG Sheng-peng. Accelerated storage test of electric equipment under integrated environmental stresses[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(3): 81-87.
- [28] 王新鹏, 张静远, 王鹏, 等. 鱼雷装备寿命分布拟合方法比较研究[J]. 建模与仿真, 2019(1): 14-21.
WANG Xin-peng, ZHANG Jing-yuan, WANG Peng, et al. Contrast study on the fitting method of life distribution of torpedo equipment[J]. Modeling and simulation, 2019(1): 14-21.
- [29] 金山. 基于 Weibull 分布的测控装备寿命预测方法研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 105-108.
JIN Shan. Life prediction method of TT & C equipment based on weibull distribution[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(7): 105-108.
- [30] 葛峰, 韩建立, 林云, 等. 多应力条件下装备加速贮存寿命评估方法[J]. 兵工自动化, 2020, 39(3): 14-18.
GE Feng, HAN Jian-li, LIN Yun, et al. Evaluation method of accelerated storage life for equipment under multi-stress conditions[J]. Ordnance industry automation, 2020, 39(3): 14-18.
- [31] 刘小西, 蔡自刚, 朱泽, 等. 水中兵器贮存寿命评价方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2018, 36(5): 47-51.
LIU Xiao-xi, CAI Zi-gang, ZHU Ze, et al. Research on the evaluation method of storage life of underwater weapons[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2018, 36(5): 47-51.
- [32] 李锴, 高军, 李小兵, 等. 装备贮存寿命综合评价方案[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2015, 33(4): 50-54.
LI Kai, GAO Jun, LI Xiao-bing, et al. Comprehensive evaluation scheme for the storage life of equipment[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2015, 33(4): 50-54.
- [33] 马珍杰. 基于维修的舰船装备自然寿命评估[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(4): 232-235.
MA Zhen-jie. The natural life evaluation of warship equipment based on maintenance[J]. Ship science and technology, 2015, 37(4): 232-235.
- [34] 杨晓钰, 方志耕, 陶良彦. 装备可靠性试验寿命评估 GERT 网络模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(5): 689-695.
YANG Xiao-yu, FANG Zhi-geng, TAO Liang-yan. Life evaluation GERT network model of equipment reliability test[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(5): 689-695.
- [35] 张旺勋, 龚时雨, 焉玉才, 等. 装备全寿命 RMS 仿真评估的需求分析[J]. 国防科技, 2010, 31(6): 14-17.
ZHANG Wang-xun, GONG Shi-yu, YAN Yu-cai, et al. A requirement analysis on the equipment life circle RMS simulation evaluation[J]. National defense science & technology, 2010, 31(6): 14-17.