

doi: 10.7690/bgzd.2020.03.004

多应力条件下装备加速贮存寿命评估方法

葛峰^{1,2}, 韩建立¹, 林云¹, 张光宇¹, 高松^{1,3}

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 92419 部队 4 分队, 辽宁 兴城 125106;

3. 中国人民解放军 91115 部队 2 分队, 浙江 舟山 316000)

摘要: 为解决武器装备贮存时功能退化、性能减弱、可靠性降低的问题, 对多应力条件下装备加速贮存寿命评估方法进行研究。概述装备贮存寿命基本概念及研究意义, 详述国内外贮存寿命预测工作研究现状, 对常用的多应力加速模型贮存寿命评估的关键环节进行分析, 提出当前加速模型研究领域存在的问题, 并对其发展方向进行展望。

关键词: 贮存寿命; 多应力; 寿命评估; 加速模型

中图分类号: TJ760.1 **文献标志码:** A

Evaluation Method of Accelerated Storage Life for Equipment Under Multi-stress Conditions

Ge Feng^{1,2}, Han Jianli¹, Lin Yun¹, Zhang Guangyu¹, Gao Song^{1,3}

(1. Navy Aviation University, Yantai 264001, China;

2. No. 4 Team, No. 92419 Unit of PLA, Xingcheng 125106, China;

3. No. 2 Team, No. 91115 Unit of PLA, Zhoushan 316000, China)

Abstract: In order to solve the problem of functional degradation, performance degradation, and reliability reduction during the storage of weapons and equipment, the accelerating life evaluation method of equipment under multi-stress conditions is studied. The basic concepts and research significance of equipment storage life are briefly introduced. The research status of storage life prediction work at home and abroad is introduced in detail. The key link of storage life assessment-multi-stress acceleration model is analyzed, and the problems existing in the current acceleration model research field are proposed. The direction of development has been forecasted.

Keywords: storage life; multiple stress; life assessment; acceleration model

0 引言

鉴于国防安全需要, 世界各国均建设部署了各型武器装备, 在打赢未来高科技战争的需求背景下, 可靠性关系着武器系统战备完好率和作战使用快速反应能力, 是一项极其重要的战术技术指标^[1]。对于装备特别是导弹装备而言, 具有“长期贮存、一次使用”的普遍特点。武器装备贮存寿命是武器装备在规定的条件贮存时能够满足规定质量要求的时间长度^[2]。导弹装备的全寿命周期中, 通常包含测试、存放、搬卸、转运、值班、发射等事件, 而贮存则是其日常最常处于的状态, 占据了全寿命中绝大多数时间。在导弹装备所处的贮存环境中, 通常包含湿热、冲击、霉菌、磁场、电压等复杂环境因素。在这些环境因素的长期影响下, 将使装备的特性参数在机械应力、化学应力、热应力等的综合作用下发生变化, 造成装备的功能退化、性能减弱、可靠性降低, 导致武器装备故障、失效, 无法投入

正常战备使用; 因此, 开展装备贮存寿命评估研究十分必要。

1 开展装备贮存寿命评估研究的必要性

1) 有助于装备科学定寿, 利于实战使用。

科学的预测能够准确评定装备的可靠性, 相应地提高保障性、检测性、维修性, 方便装备的实战使用, 确保随时出动、随时使用, 从而提高作战效能。比如俄罗斯的“C-300”等系列导弹, 经科学试验评估寿命之后, 能够在 10 a 的贮存期内无需测试、即出即用, 期限内各部件无需更换, 开箱完好率在 90%以上^[3]。

2) 有助于延寿工程实施, 节约大量经费。

武器装备通常价格高昂, 各国对于服役期满的装备通常要开展延寿工作以恢复装备各项功能、挖掘寿命潜力, 避免花费巨额经费采购、研发替代装备, 从而节约国防开支。而科学的研究装备贮存寿命对于衡量装备的寿命潜力、判定装备的延寿价值、

收稿日期: 2019-10-29; 修回日期: 2019-12-06

作者简介: 葛峰(1988—), 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: 105375796@qq.com。

确定延寿工作重点环节具有重大指导意义，有助于延寿工作的顺利开展^[4]。

3) 有助于发现装备寿命薄弱环节，提高设计寿命。

通过自然/加速贮存试验来评估装备贮存寿命，期间通过统计故障类别、判定失效模式、分析失效机理及敏感应力，寻找装备寿命薄弱环节，有针对性地改进装备设计和工艺缺陷，尽可能在装备工程研制阶段优化装备寿命，提高装备固有可靠性^[5]。

贮存寿命评估工作的作用如图1所示。贮存寿命评估工作是装备科学定寿、开展延寿工作、提高寿命设计的基础，对于提高装备可靠性、保障性，降低寿命周期费用意义重大，具有重大的军事与经济意义。

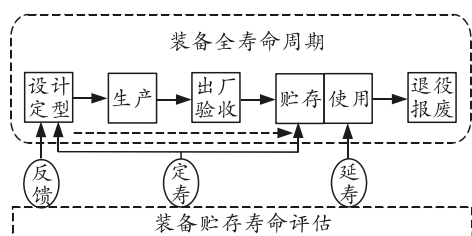


图1 贮存寿命评估工作的作用

2 国内外研究现状分析

综合国内外情况，贮存寿命评估工作通常通过自然贮存试验、加速贮存试验2类方式开展^[6]。前者指使产品在典型的实际环境下长期贮存，依据计划时间点去检测各项性能指标，依据失效判定指标，计算出贮存寿命。这种方式成熟可靠、评估准确，但所需时间周期长，寿命评估结果滞后，预测价值不大。后者的核心思想是以贮存失效机理不变为前提，利用提高环境应力水平的方式加快老化，依据产品高应力水平下的失效数据推导正常应力水平下的寿命。这种方法具备时间周期短、评估效率高、预测价值大、节约成本的优点，伴随着加速寿命试验技术的不断进步，用该方法得出的预测结论准确性正在逐步提高。

2.1 美国研究现状

20世纪70年代，美国通过自然贮存寿命试验跟踪记录产品的各项指标，将加速贮存试验作为辅助手段，监测老化规律，从而建立加速模型预测寿命。通过持续进行性能改进保持技术优势，一般能够提前3~5a预报寿命，并向着对服役导弹进行健康管理，事实预测具体导弹寿命的方向发展。著名的案例如美国大力神II导弹延寿工作，该计划于

1971年开始实施，通过一系列的计划措施，及时发现该型导弹在贮存期的问题，提高了可靠性，使其服役长达25a^[7]。此外，民兵III导弹于1970年开始服役，经美军1985年组织的延寿改进，计划使其服役至2030年，服役时间长达60a，大大超过其10a的设计寿命指标^[8]。美国贮存寿命评估技术路线发展历程如图2所示，20世纪90年代后期，美军加快加速试验评估产品寿命研究，利用实验室获得加速寿命信息在较短时间内实现了产品贮存寿命的预测，形成了MIL-STD-810军用标准，经多次系列修改，从基本版到2008年G版共历经了8个版本^[9-10]。

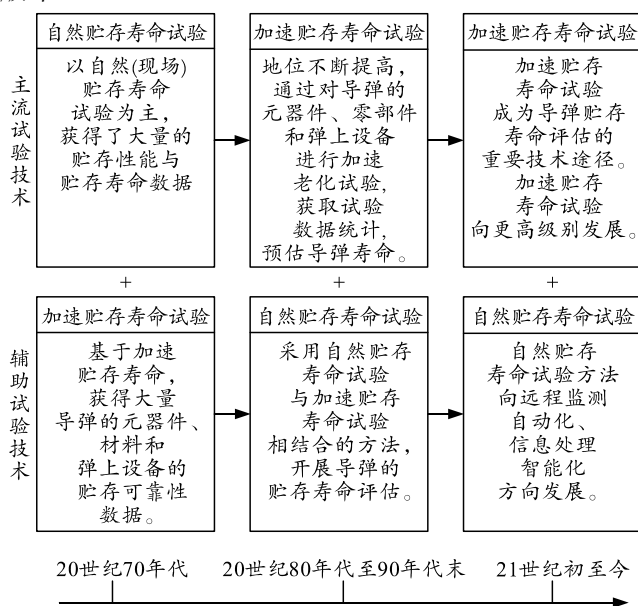


图2 美国贮存寿命评估技术路线发展历程

2.2 俄罗斯及其他国家研究现状

俄罗斯的贮存试验倾向于采用加速试验方法进行装备贮存可靠性和寿命预测，陆续开展了SS-18(撒旦)、SS-19(匕首)、SS-25(白杨)等战略装备的延寿工作，积累了丰富的经验。俄罗斯加速贮存试验的理论和方法成熟，在研制阶段十分注重寿命设计，采用加速贮存寿命试验暴露产品薄弱环节，开展寿命设计改进后进行试验验证，在装备设计研制阶段即可达到较长寿命评估的水平。俄罗斯的军工企业对加速寿命试验技术的应用已非常普遍，其中火炬机械制造局研制生产的“道尔”等系列防空导弹，可做到10a贮存期间无需检测、开箱合格率大于等于90%和发射成功率大于等于80%的水平，实现长贮存期与高可靠性的并存^[11]。

美、俄两国之外其他国家的加速贮存试验技术的相关报道较少。意大利对Aspide导弹固体发动机

组织开展了 13 周 (71 °C 条件下) 的加速贮存试验, 可以等效自然环境下 7~8 a 的贮存结果, 英国通过延寿工作按期更换导弹易损部件, 提高了“海标枪”导弹的贮存寿命^[12]。

2.3 国内研究现状

在国内, 加速贮存试验的研究与应用起步相对较晚, 20 世纪 90 年代才开始相关研究, 但已日益受到重视。熊英等依据拉伸断裂伸长率进行失效判定, 探索分析了丁腈橡胶的失效过程, 推测出其在常温条件下的寿命为 19 a^[13]; 唐国金等通过高温老化加速试验, 结合粘弹性随机有限元法建立模型, 对固体火箭药柱的贮存寿命进行了评估^[14]; 吕延龙等探索建立基于人工神经网络的预测模型, 对发射药寿命进行了评估^[15]; 曹付齐等采用加速老化试验方法预测固体火箭发动机装药在 25 °C 下的贮存寿命为 13.7 a^[16]。从整体上看, 国内加速试验研究得到了蓬勃发展, 掌握了非金属材料、电子元器件等的加速试验方法, 但从研究对象级别上来看, 大都为材料级、器件级, 研究载体大都是电子器件、助推剂和橡胶产品等。

近年来, 国内加速试验的研究开始由元器件、材料级向分系统级、整机级方向发展, 由单一应力的情况向双应力、多应力等综合应力方向发展。国内学者开展了加速寿命试验设计和寿命模型方面的研究工作, 但对相关模型和方法的研究还缺乏深度, 而对于贮存寿命评估工作, 加速模型是反映产品寿命与多应力之间物理化学关系的关键; 因此, 笔者将对多应力加速模型进行重点探讨。

3 多应力加速模型简介与探讨

国外在 1870 年左右就已经对单应力加速模型展开了研究: 英国人胡德 (J.J.Hood) 于 1878 年提出了温度指数模型; 荷兰人范特霍夫 (Van't Hoff) 于 1884 年建立了描述温度与化学反应速率关系的范特霍夫模型; 瑞典人阿罗尼兹 (Svante Arrhenius) 于 1887 年得出了关于描述温度应力的阿罗尼兹模型。进入 20 世纪后, 美国人艾林 (Eyring) 首先将量子力学、统计力学应用于化学, 于 1935 年得到了反应速率的过渡态理论艾林模型, 此外还有常用于研究电应力的逆幂律模型 (inverse power model)、指数模型 (exponential model) 等^[17]。而实际中, 产品所处的环境因素复杂多样, 引起的环境应力也是多样化的, 比如受到温度、腐蚀、振动、湿度等的综

合影响, 造成了产品的退化。所以, 在加速试验设计中应用综合应力, 建立多应力加速模型, 能够提高试验效率、缩短试验周期、节约试验费用、更真实地符合客观环境条件, 从而得到更加可信的寿命预测结果。现将重点简介一些得到普遍应用的多应力加速模型^[18-19]。

3.1 威尔士模型

威尔士 (G.L.Weleh) 通过研究非金属材料在温度-湿度综合应力下的失效行为, 得出在温湿环境中材料的寿命外推经验公式:

$$\frac{C}{K} = \tau [H_2O]; \quad (1)$$

$$\ln \frac{C}{K} = A + B \frac{1}{T}。 \quad (2)$$

式中: $\frac{C}{K}$ 为与湿度有关的老化速率常数; τ 为材料寿命; $[H_2O]$ 为水蒸气摩尔浓度; T 为实验温度; A, B 为常数。

3.2 朱可夫动力学模型

朱可夫 (Zhurkov) 的断裂理论认为, 材料的断裂是微观上化学键断裂的过程, 内部应力作用减弱了材料化学键之间活化能, 加速了材料的老化, 从而建立了寿命与破坏应力和活化能之间的关系, 材料从完好状态到完全断裂的时间 t 与拉伸应力 σ 可以表示^[20]为:

$$t = a \exp\left(\frac{U - \gamma\sigma}{RT}\right)。 \quad (3)$$

式中: U 为断裂活化能; a 为与温度无关的常数; γ 为应力系数; R 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度, K 。该模型是阿罗尼兹模型的改进, 模型中增加了应力参数, 主要用于评估温度和恒定应力双应力下的老化情况。

3.3 凯默尼模型

加速电压试验的凯默尼 (Kemeny) 模型是以综合温度和电压载荷为基础建立的模型。

$$\lambda = \exp(C_0 - E_a / KT_j) \exp[C_1 (V_{ab} / V_{abmax})]。 \quad (4)$$

式中: T_j 为结点温度; V_{ab} 为集成电极电压; V_{abmax} 为在断开电压前的最大集成电极电压; E_a 为材料的激活能; K 玻尔兹曼常数 $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$; C_0, C_1 为材料常数。

在某些情况下, 电压并不是理想的加速载荷。因为作用电压不应超过装置的崩溃电压, 崩溃电压

不比工作电压高很多，导致放大有限，所以试验时间压缩量有限。在同样的电压下，不同的损伤机理可以造成不同程度的影响，就意味着产品的变化不会以相同的速率产生。

3.4 广义艾林模型

1941 年，艾林 (Eyring)、格拉斯特尼 (Glasstene) 和莱德列 (Laidler) 提出广义艾林模型，常用于描述温度和另一个非热力学应力 (如电压、湿度) 对产品寿命的影响，表达式如下：

$$L(T, V) = \frac{A}{T} e^{\frac{B}{KT}} e^{V \left(C + \frac{D}{KT} \right)} \quad (5)$$

式中：\$L\$ 为产品寿命特征；\$A, B, C, D\$ 为待定参数；\$K\$ 为玻尔兹曼常数 \$8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}\$。

3.5 派克模型

湿度对一些电子器件、半导体产品的性能退化有较大影响，通常伴随温度作用于产品氧化、腐蚀等退化过程。1986 年，派克 (D.S. Peck) 在汇总了众多稳态试验的结果上，经过比较分析，给出了描述温湿度的加速模型：

$$L = AH^{-m} \exp\left(\frac{E_a}{KT}\right) \quad (6)$$

式中：\$L\$ 为产品寿命特征；\$A, m\$ 为未知参数；\$H\$ 为湿度；\$T\$ 为温度；\$K\$ 为玻尔兹曼常数 \$8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}\$；\$E_a\$ 为活化能。该模型主要用于温湿度综合环境加速试验数据分析，其实是一种广义艾林 (Eyring) 模型。

3.6 湿-热-力模型

在产品老化过程中，同时受到湿度、温度和应力的联合影响时，应同时考虑三者的作用，模型表达式为

$$L(T, M, \sigma) = \frac{f(\sigma)}{T} \exp\left(\frac{A}{KT}\right) \exp\left[M\left(B + \frac{C}{KT}\right)\right] \quad (7)$$

式中：\$L\$ 为产品寿命特征；\$A, B, C\$ 为模型参数；\$M\$ 为相对湿度；\$T\$ 为绝对温度，\$K\$；\$f(\sigma)\$ 为与应力相关函数；\$\exp\left(\frac{A}{KT}\right)\$ 为材料老化基本模型；\$\exp\left[M\left(B + \frac{C}{KT}\right)\right]\$

为对应温度、湿度作用下的老化模型；\$\frac{f(\sigma)}{T}\$ 为温度条件下应力老化影响模型。

3.7 非参数模型

随着深度学习、数据挖掘算法以及计算机硬件技术的不断发展，一些学者尝试将人工神经网络、支持向量机、深度信念网络等算法引入产品寿命预测工作中。张慰等建立了基于 BP 神经网络的多应力加速寿命试验模型，并采用蒙特卡罗仿真算法进行验证，预测相对误差在 \$\pm 10\%\$^[21]；孙富强等建立一种基于灰色-支持向量机的多应力加速寿命试验模型，给出利用该模型进行寿命预测的实施方法^[22]；张利国等建立了一种基于深度信念网络的多应力寿命评估模型，可用于涉及多应力下长寿命电子器件产品的可靠性评估^[23]。模型基本流程如图 3。

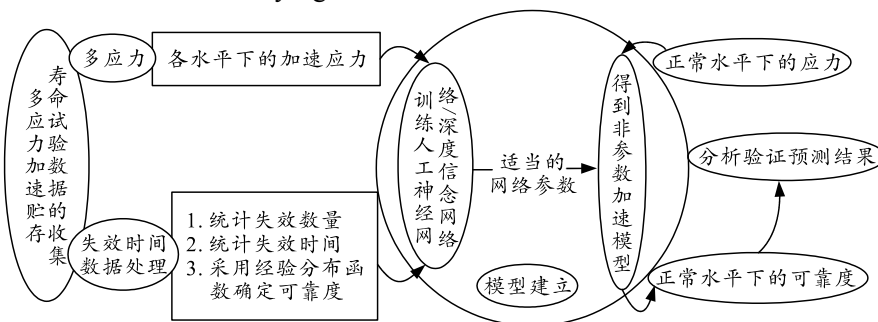


图 3 非参数多应力加速寿命预测模型评估流程

4 结论

综上所述，目前的多应力加速模型研究仍然存在一些问题：

1) 模型本身的建立基础问题。由于现实中多应力退化过程复杂，学者通常采取基于参考成熟的单应力加速寿命试验进行复合的方法建模，在建模过程中普遍进行了各类假设，而最常见的假设是忽略各应力之间的耦合作用，认为各个应力间互相独立、

互不作用，通过单应力模型之间简单的复合得到多应力加速模型。基于该假设的模型描述反映的正确性和客观性存在瑕疵。如若建模时能够考虑以上多应力之间的互相作用，无疑会更加准确、客观地揭示寿命与多应力间的联系。

2) 模型的研究级别普遍较低。模型大多数是针对材料、器件级别，由于各器件失效机理的不同、失效模式各异，对于整体寿命则以竞争失效的形式

呈现, 其退化、失效过程更加复杂^[24]。对于组件、分系统、整机级寿命, 现有的模型大都难以描述。

3) 模型本身参数的求解问题。大多数模型存在着许多待定参数, 随着模型考虑的应力数量的增多, 其形式也越来越复杂, 待定参数的增加造成模型难以求解、降低了拟合精度。采用人工神经网络、支持向量机等非参数方法建模虽然可以避免求解多元似然方程, 但是仍存在训练样本需求量大、模型无法直观表达、网络层次及隐节点的选取缺乏理论支撑等问题。

参考文献:

- [1] 蔡忠义, 项华春, 王攀, 等. 竞争失效下多元退化建模的导弹贮存寿命评估[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 1183-1188.
- [2] 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: 4-5.
- [3] 李慧志, 穆希辉, 张烜工, 等. 基于加速试验的制导弹药贮存寿命评估综述[J]. 飞航导弹, 2019, 49(1): 82-86.
- [4] 徐真红. 武器系统的贮存寿命预测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [5] 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, 64.
- [6] 孔占兴. 长期贮存寿命评估方法研究[J]. 电子与封装, 2014, 14(8): 45-48.
- [7] 李海波, 张正平, 黄波, 等. 导弹贮存试验技术与贮存可靠性评估方法研究[J]. 质量与可靠性, 2006, 21(6): 20-23.
- [8] 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, 23(4): 17-22.
- [9] 祝耀昌, 魏莱, 程丛高. GJB150/150A、GJB4239 和 MIL-STD-810F/G 的特性和相互关系分析[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(3): 243-249.
- [10] 章涵. MIL-STD-810G 主要特点分析[J]. 航空标准化与质量, 2012, 41(5): 47-50.
- [11] 周堃, 罗天元, 张伦武. 弹药贮存寿命预测预报技术综述[J]. 装备环境工程, 2005, 23(2): 6-11.
- [12] 冯志刚, 方昌华, 李静. 国外导弹加速老化试验现状分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2008, 37(2): 30-34.
- [13] 熊英, 付宝强, 郭少云, 等. 丁腈橡胶应力加速老化行为的研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 52-55.
- [14] 唐国金, 申志彬, 田四朋, 等. 固体火箭发动机药柱概率贮存寿命预估[J]. 兵工学报, 2012, 33(3): 301-306.
- [15] 吕延龙, 曹营军, 田春雷. 用神经网络技术预测库存发射药安全寿命的可行性[J]. 火炸药学报, 2003, 26(1): 68-69, 73.
- [16] 曹付齐, 刘志成, 李小换. 某固体火箭发动机装药加速老化试验与贮存寿命预测[J]. 航空兵器, 2014, 51(4): 58-61.
- [17] 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.
- [18] 李晓阳, 姜同敏. 加速寿命试验中多应力加速模型综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(5): 828-831.
- [19] 黄婷婷, 姜同敏. 加速寿命试验中统计加速模型综述[J]. 装备环境工程, 2010, 7(4): 57-62.
- [20] 张昊, 庞爱民, 彭松. 固体推进剂贮存寿命非破坏性评估方法(Ⅲ): 预测残留寿命延寿法[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(4): 279-282.
- [21] 张慰, 李晓阳, 姜同敏, 等. 基于 BP 神经网络的多应力加速寿命试验预测方法[J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1691-1696.
- [22] 孙富强, 李晓阳, 姜同敏. 一种基于灰色支持向量机的多应力加速寿命试验预测方法[P]. 北京: CN102270302A, 2011-12-07.
- [23] 张利国, 孙启龙. 基于深度信念网络的多应力下长寿命电子器件可靠性寿命评估方法[P]. 北京: CN108664690A, 2018-10-16.
- [24] 盖炳良, 滕克难, 王浩伟, 等. 整机级装备贮存延寿试验技术[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(1): 169-174.