

产品定寿与延寿中的几个环境问题

赵保平, 孙建亮, 张韬, 于英扬, 雷涛

(北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要: **目的** 提出产品定寿与延寿中应注意的5个问题,为产品延寿和寿命预测提供一些思路。**方法** 在分析产品及其寿命周期环境特点的基础上,结合产品寿命研究及寿命周期故障情况,并借鉴国外相似产品贮存条件与寿命情况。**结果** 产品寿命受贮存期间的温度、湿度、含氧量等环境条件和执勤过程中的环境条件影响,与产品复杂程度有关,并最终体现在时间效应上。**结论** 应增强“产品设计重在防护”思维,做好寿命准确分析预测需要长时间的心理准备,在实施中坚持理论与实践相结合。

关键词: 寿命周期; 延寿; 自然环境试验; 加速贮存试验

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.04.005

中图分类号: V263.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)04-0021-05

Some Problems of Environment Engineering in Life Estimation and Prolongation of Products

ZHAO Bao-ping, SUN Jian-liang, ZHANG Tao, YU Ying-yang, LEI Tao

(Beijing Mechanical-electronic Engineering Institute, Beijing 100074, China)

ABSTRACT: Objective Five problems were summarized in order to put forward some consideration to prolong and forecast product life. **Methods** Firstly, product and its environment characteristics in life cycle were analyzed. Secondly, the experience of life and faults in domestic product were summarized. Thirdly, storage condition and life information of oversea similar products were consulted. **Results** Product life was affected by environment conditions, such as instance temperature, humidity and oxygen in its storage place or the condition of keeping as armaments. And it was related to the complexity of products. At last it was reflected in time effect. **Conclusion** The opinion of "Emphasized protection in product design" should be enhanced, and we should get ready to precisely forecast product life in a long-term view, and persist in combining theory and practice in future study.

KEY WORDS: life cycle; life prolongation; natural environment test; accelerated storage life test

收稿日期: 2014-05-30; 修订日期: 2014-06-21

Received: 2014-05-30; Revised: 2014-06-21

作者简介: 赵保平(1962—),男,河北石家庄人,研究员,主要从事产品环境工程、环境试验和可靠性试验技术研究和管理工作。

Biography: ZHAO Bao-ping (1962—), Male, from Shijiazhuang, Hebei, Professor, Research focus: environmental engineering, environmental test, reliability test and management.

经过几十年的发展,我国装备产品走过了从研仿到自主设计生产的全过程,经历了从低速到高速、从近程到远程、从分立器件到集成电路、从模拟式到数字式等方面的变化过程,并在几十年间向用户提供了从单一品种到多品种多平台产品。从20世纪80年代开始,早期产品陆续进入了寿命后期,因此陆续开展了寿命问题研究。鉴于大量产品属于长期贮存、一次使用,在贮存期有值勤的特点,研究主要集中在围绕库房贮存、自然环境暴露等问题展开,也因此积累了丰富的经验,并形成了相关标准^[1-3]。产品寿命的影响因素很多,特别是局部微环境影响与产品结构、材料等有关,所以形成精确模型比较困难,甚至有些因素及其影响尚无法确认。文中根据寿命周期内贮存中的一些故障情况进行分析,提出了相应的环境影响问题。

1 产品及其寿命周期环境特点

产品研制中的一个主要目的是确定外界环境对产品的影响,按环境专业的说法就是求产品寿命期各种环境集合与产品敏感因素的交集,并采取设计措施^[1-2]。研制中,大部分极限环境、特殊环境一般都能比较准确地确定,并在实验室中能够较好验证,但对寿命期经历的库房等自然环境的认识存在局限性,其看似简单,但难以准确分析其影响。

航天产品具有长期贮存、一次使用的特点,中间穿插一定时间的值勤任务。由于其具有多平台使用的特点,因此使用地域十分广泛。上述特点决定了产品寿命周期内经历的环境大部分时间在不同地点的库房内,一定时间处于值勤状态,其中值勤状态的产品直接暴露于大气环境中。由此,贮存和值勤是产品寿命期的主要部分,主要受到库房和平台环境影响。

航天产品构成复杂、层次多,在集成制造过程中各部分投产的时间点不同,因此,寿命周期不同于交付产品,材料、元器件、零组部件、设备、分系统均长于产品要求,如图1所示。所受的环境也不完全与产品整体相同,一方面要经历出厂到集成阶段,包括贮存、运输、工艺制造等人为诱发环境,同时还要经历出厂后内部微环境影响。这也是延寿的理论基础。

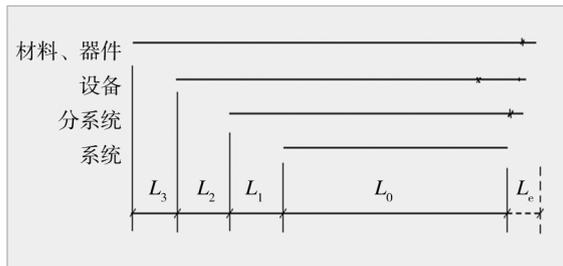


图1 产品各层次寿命期

Fig. 1 Lifetime on different product level

2 产品寿命研究及寿命周期故障情况

2.1 历史回顾

从20世纪80年代开始研究,直到2000年左右,产品批量增大,使用、存储、寿命等问题开始非常突出,开始了大范围试验与延寿工作。

从20世纪80到90年代对库存产品进行了大范围调研,统计结果显示南海暴露的问题和故障多,主要是潮湿影响。同时对20世纪70年代的产品开展了延寿试验等工作,对某两型产品重点开展了短寿件和系统级的延寿试验,根据试验结果提出了增加防护衣等防护措施。

从20世纪90年代到21世纪初,进行了大规模调研,统计结果仍是南海故障率较高,辅助设备故障率高于主要产品。对一些关键件、裸露件等开展了系统性的自然环境试验,同时开展了大规模延寿试验,重点对某三型产品进行了延寿试验和自然环境试验。根据试验结果提出了改进,如对线路板增加三防漆工艺、系统级产品增加密封包装发射箱等防护措施。此外,对大量在用产品进行了跟踪测量研究和试验,结果用于产品设计改进。

到目前为止,定型的每类产品都要进行试验,定型或批产后投入一批产品分成几组对其开展不同地点的贮存试验。其中一组要求与产品正常使用经历完全相同,并记录相关数据。同时平行投入备品备件和相应新材料新构件的试验。目前累计约有近百个产品。

通过上述自然环境试验和部分产品的延寿试验,已经得出了相应寿命的确切结论。

2.2 产品使用故障及寿命情况

1994 年对某类产品进行了大范围试验和跟踪测试,根据统计数据得出结论:在库房贮存检测中,对不同地点的故障数进行了统计,设备复杂程度越高,故障数越多;按照地点分布情况,南海地区故障数最多。执勤环境情况下,随着执勤时间的延长,故障数增加。分析确定的主要环境影响因素是温度和湿度。

1998 年某类系统级产品的调查统计显示,某库房有多个包装箱贮存产品 15 年后开启测试,75% 以上的无故障,其中有的 3 个月之后仍无故障。另外一个库房贮存的多个产品 14 年后启封测试,72% 的产品无故障,其中有的 4 月后仍无故障。说明 20 世纪 80 年代产品包装贮存 14 年不经检测有 70% 以上的产品能够保持规定的功能。启封越早,故障越多,因为破坏了贮存的环境。对故障分析中,发现设备分系统级的 9 种产品中,有 7 种产品的故障原因与潮湿有关,占到了 78% 以上^[3]。特别应该注意的是,某些产品在潮湿环境下发生的故障,在干燥环境下消失。在南方发生的故障设备运到北方后消

失,这可能有 2 种原因:金属材料受潮后有电化学腐蚀、应力腐蚀、表面氧化电解等现象和非金属材料受潮膨胀在不同材料之间产生应力;绝缘材料老化、受潮后绝缘电阻下降、电性能发生变化。

1990 年至 2004 年近 15 年间,在海南三亚、万宁投入复合材料产品用于贮存、暴晒试验,以验证其室内贮存寿命和露天暴晒寿命。相同类型的产品分为 2 组,其工艺、材料等状态完全相同,分别用于室内贮存和露天暴晒。暴晒试验于 1996 年完成试验收回试验件,库房、棚下试验 2004 年完成试验收回试验件,所有试验件均在进行了外观检查分析确认后,置于库房存放,待系统延寿试验同时进行性能检测。2005 年在进行系统延寿期间对所有试验件分别进行了电性能、温度、力学等试验,表明全部满足设计要求,暴晒寿命达到 24 个月以上,库房贮存寿命达到 15 年以上。

2012 年对在不同库房的某 2 个批次的产品进行统计,意图通过分析故障率与库房环境特性之间的联系,确定影响产品故障与寿命的主要因素,结果见表 1。初步认为温度、湿度和湿度的波动可能是影响产品故障的主要因素。

表 1 库房贮存环境与产品故障

Table 1 The relationship between storage environment and product failure

库房	平均温度/℃	温度差/℃	平均相对湿度/%	相对湿度差/%	绝对湿度/(g·m ⁻³)	露点温度/℃	批次 1 故障率	批次 2 故障率
1	22	1	65	8	13	16	0.2	0.92
2	20	8	60	25	14	15	1.49	1.40
3	15	2	53	21	7	6	1.35	0.2
4	14	2	55	27	7	8	0.32	0.2
5	11	4	53	28	6	6	0.56	1.93
6	6	2	53	25	5	0	0.33	0.3
7	6	2	54	21	5	0	0	1.09
8	7	1	61	13	5	4	1.05	0.2

3 国外相似产品贮存条件与寿命情况

查阅国外相似产品相关资料表明,库房环境与包装对产品的寿命影响至关重要,因此相关文件规定也十分严格。规定系统级产品在油封状态有空调的库房(恒温恒湿)贮存,贮存期为 6 年;在无空调

设备的库房贮存,贮存期为 4 年;在野外条件下的遮雨棚贮存期为 6 个月;在启封状态下有空调设备库房里贮存期为 1 年。对产品内部设备也有相应的规定,根据设备包装与存放条件不同而不同,见表 2。其中,特别强调对包装箱内含氧量控制十分严格,并具有长期贮存、免测试、开封即用的要求。

表2 产品内设备的使用期限规定

Table 2 The storage life limit of different products

包装方式	存放位置	贮存期限/年
贮运密封箱(充氮气)	各种仓库	12
	空调仓库	6
贮运密封箱(干燥空气)	普通仓库	4
	棚下	2
包装箱启封	空调仓库	3
	普通仓库	1.5
	棚下	1
防护罩	飞机挂架	1

4 产品寿命周期环境影响问题分析

根据上述国内外情况,可以得出温度、湿度、含氧量、使用维修等对产品寿命影响很大,产品层次不同,要求差异也存在不同。产品贮存中库房条件不大的差异造成寿命差异很大。

4.1 包装与贮存温湿度环境影响问题

恒温恒湿库房条件下产品寿命高出无空调库房寿命将近1倍,很多贮存环境规定了较低的露点温度,因此,对寿命的影响应与温度、湿度及其波动有很大关系。特别是作为复杂产品,由于产品具有外壳密封等特殊形式,温度波动带来的产品包装和内部结构变化以及呼吸作用等过程有助于湿度的传播和影响。我国库房贮存产品故障率南高北低的差异也说明,影响的结果与库房具体环境条件和产品特点有很大关系,有统计研究结论称,贮存环境差异造成失效率的差异也比较大,平均温度越高,失效率也越高^[4]。也有大量产品的贮存结果表明,湿度影响最大^[3]。产品吸湿量变化与贮存环境湿度变化趋势一致,其对性能影响程度与湿度成正比^[5]。在产品贮存期远高于设计寿命并不开箱的情况下,很多产品性能状态表现良好,一旦开箱测试或使用,则故障凸现。这些产品在研制过程中进行的高温高湿、温湿度循环试验中的温度、湿度及其波动程度远高于库房的温湿度条件,却不出现故障,而贮存中的温湿度却表现出更大的影响。这至少说明两者故障机理和故障模式存在较大差异,库房中的很多故障属于典型的贮存故障,不同于研制中温度湿度试验的

作用机理,可能存在还没有认识到位的重要影响因素,其中长期贮存下的产品本身特性变化与温度/湿度的相互作用机理需要研究。可能的解释是,开箱测试时,本来稳定的状态被打破,环境的直接影响大幅增加。外部潮湿直接与元器件、原材料等接触,导致已经长期热老化或存在缺陷材料器件等性能降低。

4.2 含氧贮存环境影响问题

包装良好并充氮气的产品寿命比充干燥空气并在恒温恒湿库房的寿命高出1倍,说明氧的影响很大。从实际暴露出的故障情况可以看出,存在表面锈蚀等情况,特别是产品的运动表面、接触表面等出现氧化、冷焊、原子运动、挥发物与氧气反应的污染物。这些也都是与温湿度共同作用结果,但其含量与研制试验暴露在大气中的氧气量相比很低,是否说明贮存中产品的环境效应不同?

4.3 执勤环境影响问题

产品在裸露或简单防护条件下的寿命,是良好贮存状态下寿命的1/10,执勤环境和产品的包装对寿命的影响之大,超出想象。在产品研制中,很多情况下是按照全寿命周期内环境剖面中的极值环境条件设计的,并经过了试验验证,也按照GJB 899进行了典型综合环境可靠性试验,其中的环境剖面包含了典型的温湿度振动环境。对它们影响差距如此之大可能的解释是,与执勤地点当地的环境特点有很大关系,可能存在没认识到的特殊性,如美军沙漠风暴的沙尘等影响,同时还存在平台诱发环境的综合影响。

4.4 产品复杂程度影响问题

从产品故障统计结果看,设备越复杂,故障率越高,结构越复杂,集成度越高,失效故障率越高。这表明设计阶段的认识存在很大差距,一方面低级别设备、器件、材料寿命长于产品,在产品集成制造过程中要经受运输、转运、加工、集成等人为影响,可能包含工艺过程对材料、结构等方面的损伤,在贮存中成为诱发故障的根源;另一方面,复杂产品的结构、质量、刚度等分布是不均匀的,在与外界环境相互作用中,形成了均匀性较差而且各不相同的微环境,正是产品本身的微环境微状态等重要特性可能直接决

定了温度、湿度影响的过程和机理^[8],以目前的技术很难清楚掌握。材料、元器件、构件等级别的建模分析还比较准确,但上升为产品系统级后,基于如此巨大的差异而进行仿真分析的模型建立是否准确可行还有待商榷。

4.5 时间效应与加速贮存问题

研制过程中的很多试验环境条件采用的是极值条件,远远高于使用中的贮存库房(温湿度)条件,且都没有出现问题,但产品在温湿度长时间作用下却出现了问题,其变化过程超出想象。可见是时间效应在起作用,贮存中的故障显然与环境量级不是线性关系,产品故障不仅仅与环境有关,而且与自身特性和时间作用有关。可能与复杂程度、材料构成、湿度传播过程、吸湿方式等,以及在长期作用下形成的微环境有关,这一点是认识分析比较困难和难以模拟的,也就是目前加速与实际结果差异的重要因素。时间效应中包括了产品重力下非均匀应力的长期作用,以及受力件长期作用松弛、材料蠕变、电参数漂移、冷焊、原子运动、氧化等现象。在长期贮存和使用中的自然环境应力和多次使用维护中的电应力、振动应力等综合应力长期积累,也会加剧元器件和材料性能下降甚至失效,使得导弹故障率上升。这些因素很难采用建模分析和加速试验方式准确预测。

同时,从产品长期贮存中性能测试结果来看,性能的变化量差异巨大,且毫无规律,贮存环境、贮存时间与产品性能退化量之间缺乏统计规律^[4]。通过产品实际情况,可以基于物理分析结果得出确切的寿命长度结论,但难以通过贮存的性能退化量建立精确的退化模型,并为加速贮存试验提供对照。由此,研制阶段通过高加速试验对寿命进行预测十分困难,还是要通过以往经验数据判断。

5 结论与建议

由上述分析,可以提出以下结论和建议:

1) 产品设计重在防护。产品贮存故障与温度、湿度有关,但产生影响的物理过程或机理不清楚,需要深入研究。对复杂产品而言,需要大量投入,时间和经费代价可能很大,因此,现阶段我国产品贮存寿命保障的重点是提高防护质量,做到库房恒温、低湿、低氧。应对产品所在地区的值班环境及其特殊

性进行深入研究,保证采取有针对性的防护措施,降低故障,延长寿命。产品设计尽量做到在贮存期间免测试或不开箱测试,减少库房温湿度影响。对复杂产品应深入分析温湿度等传播影响机理,尽量采取措施阻断其传播路径。设计初期应对早期产品材料、器件、产品的寿命信息进行分析,短寿、易损等材料尽量避免,如果无法避免,设计应安排在易于修理、更换等部位,降低维护与延寿成本。

2) 寿命的准确分析预测需要长时间坚持理论与实践结合。由于复杂产品贮存环境影响机理复杂,认识需要长期研究过程,相应分析模型很难准确,因此,一方面要不断分析已有产品的设计贮存结果和环境,同时要投入产品进行自然环境试验,并坚持同步开展加速试验研究。不急于求成,坚持长期跟踪收集数据。从底层做起,逐步推广到系统级产品。坚持建模仿真分析,与加速贮存试验技术研究相结合,不断修正预测模型。

6 结语

寿命影响因素很多,目前的延寿技术都是基于朴素的短板修复思想,准确确定寿延寿从理论上说清楚需要长时间工作,美俄等发达国家的延寿技术都是经过长时间不断修正完善的结果。同时准确预测产品寿命的基础是掌握产品特性,还要坚持理论分析与试验建模结合,争取经过20年时间实现精确的预测目标。以上为笔者个人的一点看法,抛砖引玉,请批评指正。

参考文献:

- [1] 赵保平,孙建亮,庞勇. 航天产品环境适应性问题研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 51—57.
ZHAO Bao-ping, SUN Jian-liang, PANG Yong. Research on Environmental Worthiness Problems of Aerospace Product[J]. Equipment Environmental Engineer, 2011, 8(2): 51—57.
- [2] 赵保平,孙建亮,庞勇. 航天产品环境适应性问题研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(3): 42—48.
ZHAO Bao-ping, SUN Jian-liang, PANG Yong. Research on Environmental Worthiness Problems of Aerospace Product[J]. Equipment Environmental Engineer, 2011, 8(3): 42—48.

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.