

应用环境应力分类的加速贮存退化试验评估方法

张海¹, 余闯², 王晓红²

(1. 西北工业大学, 西安 710068; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: **目的** 解决加速试验在估计产品贮存寿命中误差较大、未考虑结合实际贮存中的退化信息等问题。**方法** 基于加速退化试验中广泛接受的基本假设, 并将其应用到实际贮存中, 把加速试验与实际贮存中的信息综合起来进行处理。**结果** 得出了一种使用实际贮存信息修正试验预计结果、估计剩余寿命的方法。**结论** 应用该方法在贮存过程中只需对少量性能参数进行测量, 即可估计产品的剩余寿命。

关键词: 贮存寿命; 环境应力; 加速试验; 性能退化

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.03.018

中图分类号: TP11 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)03-0087-04

A New Accelerated Storage Degradation Test Estimation Method Based on Environmental Stress Classification

ZHANG Hai¹, YU Chuang², WANG Xiao-hong²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710068, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: **Objective** To solve the problems of the relatively large error of accelerated test in estimating the product storage life, and not considering the actual storage degradation information. **Methods** The widely accepted basic assumptions of accelerated degradation test was applied in actual storage, and the information from both actual storage and accelerated degradation test was brought together for analysis. **Results** A new method which could amend the test results by actual storage degradation information and estimate the remaining life was obtained. **Conclusion** By using this method, we could estimate the remaining life in actual storage only after measuring several performance parameters.

KEY WORDS: storage life; environmental stress; accelerated test; performance degradation

对于需要长期存放的产品, 贮存寿命是其重要的指标参数, 而影响贮存寿命长短的主要因素包括

产品本身质量特性和温度、湿度等贮存环境条件^[1-4]。贮存中的产品在环境条件的作用下出现老

收稿日期: 2014-01-16; 修订日期: 2014-03-21

Received: 2014-01-16; Revised: 2014-03-21

作者简介: 张海(1977—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为可靠性试验与装备管理。

Biography: ZHANG Hai(1977—), Male, Master graduate student, Research focus: reliability test and equipment management.

化、蠕变、扩散、腐蚀等退化现象,进而引起性能参数变化直至寿命终结。这是一个十分漫长的过程,为了在较短时间内对产品的贮存寿命进行评估,加速贮存寿命试验、贮存退化试验、将两者结合的加速贮存退化试验已广泛应用到工程实际之中^[5]。随着产品质量的提高,贮存环境的改善,其贮存寿命也越来越长,加速贮存退化试验凭借其所需样本量少、试验时间短的优势获得了越来越多的应用,但这些方法都是只使用了试验数据,而不能结合贮存中获得的实际退化数据进行寿命评估。

1 加速贮存退化试验

加速退化试验在理论上基于以下几个基本假设。

1) 失效机理不变假设:即产品在正常应力和各加速应力下的失效机理不变。该假设是对加速试验最基本的要求,只有在失效机理不变的情况下,使用加速应力的试验结果推测正常应力下的情况才是有意义的。

2) 加速模型假设:产品的寿命特征与应力水平之间满足一定的加速模型。该假设在假设 1 的基础上,进一步保证了使用加速应力下的试验结果推测正常应力下的情况是可行的,常见的加速模型有阿伦尼兹模型、艾伦模型等。

3) 同族假设:根据使用数学工具的不同,该假设可有不同的表述,如“产品在正常应力和加速应力下的寿命(退化量)服从同一分布,即改变应力水平不会改变寿命(退化量)分布类型”,或“在正常应力和加速应力下,产品的退化曲线形式相同,即应力水平变化时,改变的只是曲线参数”。该假设保证加速和退化在数学上可描述。

4) Nelson 假设^[6]:产品的残存寿命仅依赖于已累积的失效和当前的环境应力,而与累积的方式无关。该假设将累积失效作为环境对产品损伤作用的外在表现,具有明显的物理意义。这一方面为步进、步退等变应力的试验提供了理论基础,另一方面也和假设 1 和 3 一道为加速因子的定义提供了支持。

加速因子有多个等价定义,如文献^[7]中的定义 2:若 $F_i(t)$, $F_j(t)$ 分别表示产品在应力 S_i 和 S_j 作用下的累积失效概率,且存在 $F_i(t_i) = F_j(t_{ij})$, 则

应力 S_i 对应应力 S_j 的环境因子 $e = t_{ij}/t_i$, 其本质是反映 2 种应力下产品失效快慢的差异。

在加速退化理论中通过确定加速模型的参数,相当于获得了任意 2 个应力之间的加速因子,但是通过加速贮存退化试验获得的都是反映高应力时产品失效情况的数据,使用这些数据来确定加速模型的参数,相当于外推估计了低应力时的失效情况,而没能够综合考虑实际贮存中获取的正常应力下的退化数据。

2 新方法的提出

相对贮存中失效机理种类的繁多,环境应力却相对简单,主要就是温度、湿度及盐雾、辐射等应力^[8]。具体到一个个可能发生贮存失效的单元上,其敏感应力往往就是单一的某种应力。根据前文所述的 Nelson 假设,同种敏感应力下不同单元的贮存退化情况,都相当于是对该种应力的累积。贮存中各单元同属一个产品,其经历的贮存环境条件相关,因此这些单元的贮存退化情况是相关的。

通常来说,产品贮存中是不易获取其退化信息的,这主要是由于退化量的测量往往需要专业测量仪器、单元的通电运行等特殊条件,甚至部分单元由于产品密封、集成等原因根本无法测量。考虑到同种敏感应力下单元贮存退化的相关性,却可以使用基于环境应力分类的检测方式,对于同一种环境应力只需检测 1 个或几个方便的单元,即可反应该种应力对产品的作用情况。

将这些实际贮存中产生的退化信息与加速试验相结合,即可减小寿命估计的误差。由此,文中提出了以下基于环境应力分类的贮存寿命估计方法。

1) 对产品进行失效机理分析,确定各贮存失效薄弱单元的敏感环境应力。

2) 对敏感应力相同的薄弱单元,使用同样的试验剖面进行加速贮存退化试验,且优先使用整机进行试验,对于整机状态不便进行退化量测量的单元,也应当模拟其在产品中的防护等情况,尽量保证同失效单元间的相对应力强度关系与实际贮存相一致。

3) 通过选择适当的同族假设对产品退化进行数学建模(如选择退化曲线形式相同而参数变化,则由试验数据拟合退化轨迹曲线),进而确定加速

模型的参数。需要指出的是,此时结合实际贮存环境应力已经可以对产品寿命进行预计。

4) 在获取实际贮存中的退化数据后,结合加速模型及退化模型(如退化轨迹族),估算实际应力水平相当于加速试验中的何种应力水平,这相当于综合了加速试验和实际贮存中的信息。

5) 使用估算得到的应力水平估计产品的寿命、剩余寿命,这与在第 3 步中估计产品寿命相比,由于结合了实际贮存信息,相当于是对加速试验的结论进行了修正。

3 应用举例

假设某产品的贮存薄弱单元中,单元 A 和 B 的敏感应力都为温度应力,两单元在 90 ℃ 以内贮存失效机理不变。对其进行温度应力分别为 50,70,90 ℃ 等 3 个应力水平各 20 天的步进加速贮存退化试验。试验中每 2 天对其性能参数进行 1 次测量,其失效判据分别为 $D_A<0.6$, $D_B<0.4$, 试验退化数据如图 1 所示。产品贮存 400 天后测得单元 A 的性能参数为 1.46,而 B 单元密封在产品中而无法进行性能测试,下面对贮存 400 天时单元 A 和 B 的剩余寿命进行估计。

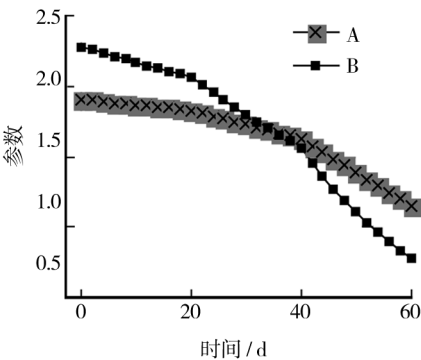


图 1 退化轨迹
Fig. 1 Degradation path

以“在正常应力和加速应力下,单元的退化曲线形式相同,改变的只是曲线参数”作为同族假设,根据单元的性能退化趋势,选择 $D_A=-k_A t+a$ 作为单元 A 的退化曲线形式, $D_B=\exp(-k_B t+b)$ 作为单元 B 的退化曲线形式^[9—12],其中 k_A, k_B 为反应速度,根据实验数据可分段拟合得到的结果见表 1。

表 1 退化轨迹参数
Table 1 Parameters of degradation path

温度/℃	k_A	a	k_B	b
50	0.003 88	1.91	0.004 87	0.824
70	0.010 1	2.04	0.013 8	1.003
90	0.023 8	2.58	0.034 8	1.84

根据 Arrhenius 模型^[13—15],认为反应速度 k 与热力学温度 T 满足以下关系:

$$k=Ae^{E/RT}$$

式中: A 为指前因子; E 为活化能; R 为摩尔气体常量。取对数并令 $\ln(A)=m$, $E/R=n$ 得:

$$\ln(k)=m+n\cdot\frac{1}{T}$$

可见 $\ln(k)$ 与 $1/T$ 满足线性关系,以此作为加速模型,由表 1 中温度和反应速度值进行线性回归,可分别得到两单元加速模型的参数,见表 2。

表 2 加速模型参数
Table 2 Parameters of acceleration models

单元	m	n
A	10.93	-5325.9
B	12.47	-5748.1

此时,若知道实际贮存温度为 24 ℃,则可算得 400 天时单元 A 的性能参数为 1.54,剩余寿命为 1023 天。

贮存 400 天后测得单元 A 的性能参数为 1.46,结合初始性能参数 1.91,由退化轨迹和加速模型的方程可知:

$$\begin{cases} 1.46=a-400\cdot k_A \\ 1.91=a-0\cdot k_A \\ \ln(k_A)=10.93-5325.9/T \end{cases}$$

解得 $T=300.6$, $K=27.4$ ℃,即实际贮存中的温度条件相当于试验中的 27.4 ℃。由于单元 A 和 B 所经历的试验条件和实际条件都是一致的,因此可将此应力水平用于计算 B 的寿命,结合失效判据对单元 A 和 B(其初始性能参数为 2.28)分别联立方程组:

$$\begin{cases} 0.6 = a - t_A \cdot k_A \\ 1.91 = a - 0 \cdot k_A \\ \ln(k_A) = 10.93 - 5325.9/300.6 \\ 0.4 = \exp(b - t_B \cdot k_B) \\ 2.28 = \exp(b - 0 \cdot k_B) \\ \ln(k_B) = 12.47 - 5748.1/300.6 \end{cases}$$

解得在实际贮存条件下单元 A 和 B 的寿命分别为 $t_A = 1162$ 天, $t_B = 1348$ 天, 即此时的剩余寿命为 $t'_A = 775$ 天, $t'_B = 948$ 天。

4 结 语

应用环境应力分类进行贮存寿命预计, 将实际贮存中的退化信息与加速贮存退化试验相结合, 得到了在贮存中修正试验预计结果、估计剩余寿命的方法。其核心思想是通过特定单元的退化情况来度量相应环境应力的作用情况, 事实上特定单元除了选择产品本身上的单元, 还可以人为地加入合适的单元, 只需要和产品一起进行加速试验和实际贮存即可。

参考文献:

- [1] 于运治, 李建林, 龚红良. 导弹贮存的失效模式及失效机理[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(4): 27—29.
YU Yun-zhi, LI Jian-lin, GONG Hong-liang. Missile Storage Failure Modes and Failure Mechanisms[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2009, 30(4): 27—29.
- [2] 党晓勇, 赵英, 庞明磊, 等. 橡胶密封件加速老化试验影响因素分析及验证[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 5—8.
DANG Xiao-yong, ZHAO Ying, PANG Ming-lei, et al. Analysis and Verification of Influencing Factors of Accelerated Aging Tests for Rubber Seals[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 5—8.
- [3] 张凯, 王丰, 朱蕾, 等. 丁腈橡胶 5171 密封件热氧老化研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 1—4.
ZHANG Kai, WANG Feng, ZHU Lei, et al. Thermal-oxidative Aging of Nitrile Rubber 5171 Sealing Element[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 1—4.
- [4] 张福光, 崔旭涛, 洪亮. 导弹火工品贮存寿命的影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 24—27.

- ZHANG Fu-guang, CUI Xu-tao, HONG Liang. Influencing Factor Analysis of Storage Life of Missile Initiating Explosive Devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 24—27.
- [5] 陈循, 张春华. 加速试验技术的研究、应用与发展[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 130—136.
CHEN Xun, ZHANG Chun-hua. Research, Application and Development of Accelerate Experimental Techniques[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 130—136.
- [6] NELSON W. Accelerated Life Testing Step Stress Models and Data Analyses[J]. Reliability, IEEE Transactions, 1980, 29(2): 103—108.
- [7] 胡斌. 环境因子的定义及研究现状[J]. 信息与电子工程, 2003, 1(1): 88—92.
HU Bin. Definition of Environmental Factors and Research Status[J]. Information and Electronic Engineering, 2003, 1(1): 88—92.
- [8] 阮金元, 阮新. 物资贮存环境条件分类研究[J]. 标准化报道, 1999, 20(3): 9—13.
RUAN Jin-yuan, RUAN Xin. Classification of Environmental Conditions Material Storage[J]. Standardized Reports, 1999, 20(3): 9—13.
- [9] HELLER R A, SINGH M P. Thermal Storage Life of Solid-propellant Motors[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1983, 20(2): 144—149.
- [10] 赵艳涛, 张文伟, 姚军. 基于退化量分布与退化轨迹的两种加速退化数据贮存寿命评估方法对比[J]. 环境技术, 2011, 4: 011.
ZHAO Yan-tao, ZHANG Wen-wei, YAO Jun. The Contrast between Two Storage Life Estimate Methods of Accelerated Degradation Data Based on Degradation Amount Distribution and Degradation Trail[J]. Environmental Technology, 2011, 4: 011.
- [11] FUKUMOTO T, THOMAS P S, STUART B H, et al. Estimation of the Storage Life of Timethylol Urea Using Non-isothermal Accelerated Testing[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2012, 108(2): 439—443.
- [12] 徐静, 李海波, 杨晋勇, 等. 膜片组件贮存失效分析与加速贮存试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 52—55.
XU Jing, LI Hai-bo, YANG Jin-yong, et al. Storage Failure Analysis and Accelerated Storage Test of Diaphragm Assembly[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 52—55.

- Seawater Desalination [J]. Marine Technology, 2002, 21 (4): 22—26.
- [4] 段焕强, 谈探. 中国海水淡化产业现状与趋势 [J]. 水工业市场, 2012 (3): 49—53.
- DUAN Huan-qiang, TAN Tan. Status and Trends of Chinese Desalination Industry [J]. Water-industry Market, 2012 (3): 22—26.
- [5] 冯厚军, 赵河立. 铜材在海水淡化行业应用及需求分析 [C] // 中国铜加工技术与应用论坛文集. 北京, 2007: 51—58.
- FENG Hou-jun, ZHAO He-li. Industry Applications and Needs Analysis of Copper in the Desalination [C] // China Copper Technology and Application Forum Collection. Beijing, 2007: 51—58.
- [6] 陈寅彪, 张建丽. 低温多效海水淡化与水电联产技术的应用探索 [J]. 神华科技, 2009, 27 (1): 47—50.
- CHEN Yan-biao, ZHANG Jian-li. The Exploration for Combining Low-temperature Multi-effect Distillation with Power Generators [J]. Shenhua Science and Technology, 2009, 27 (1): 47—50.
- [7] 曹军瑞, 赵鹏. 低温多效海水淡化工程材料的选用 [J]. 电力勘测设计, 2008 (6): 50—55.
- CAO Jun-rui, ZHAO Peng. Selection of Engineering Material of Distillation of Seawater with Low Temperature and Multi-effect Function [J]. Electric Power Survey & Design, 2008 (6): 50—55.
- [8] NARAIN S, ASAD S H. Corrosion Problems in Low-temperature Desalination Units [J]. Materials Performance, 1992, 31 (4): 64—67.
- [9] MALIK Anees U, MAYAN KUTTY P C. Corrosion and Material Selection in Desalination Plants, SWCC 0 & M Seminar, Al Jubail. April 1992.
- [10] 聂鑫, 孙小军. 低温多效蒸馏海水淡化国产阻垢剂的工业试验研究 [J]. 华北电力技术, 2012 (1): 12—16.
- NIE Xin, SUN Xiao-jun. Test of Localized Antifouling Applied in MED Desalination Plant [J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2012 (1): 12—16.
- [11] ROBERGE P R. 腐蚀工程手册 [M]. 吴荫顺, 译. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- ROBERGE P R. Handbook of Corrsion Engineering [M]. WU Yin-shun, Translation. Beijing: China Petrochemical Press.
- [12] AVANCE U R. 金属的腐蚀与氧化 [M]. 华保定, 译. 北京: 机械工业出版社, 1976.
- AVANCE U R. Metal Corrosion and Oxidation [M]. HUA Bao-ding, Translation. Beijing: Machinery Industry Press, 1976.
- [13] 何叔麟, 万传琨. 黄铜带材表面变色原因分析 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1991, 3 (4): 41—43.
- HE Shu-lin, WAN Chuan-kun. Analysis of Brass Strip Surface Discoloration [J]. Corrosion Science & Protection Technology, 1991, 3 (4): 41—43.
- [14] REVIE R W. 尤利格腐蚀手册 [M]. 杨武, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- REVIE R W. Uhlig's Corrsion Handbook [M]. Yang Wu, Translation. Beijing: Chimerical Industry Press, 2005.
- [15] 黄桂桥. 铜和铜合金在海水中的耐蚀性 [J]. 山东腐蚀与防护, 1989 (2): 24—29.
- HUANG Gui-qiao. Corrosion Resistance of Copper and Copper Alloy in Seawater [J]. Shandong Corrosion and Protection, 1989 (2): 24—29.
- [16] 黄桂桥. 铜及铜合金在青岛海域的腐蚀和污损 [J]. 材料保护, 1997, 30 (2): 7—9.
- HUANG Gui-qiao. Corrosion and Fouling of Copper and Copper Alloy in Qingdao Seawaters [J]. Materials Protection, 1997, 30 (2): 7—9.
- [17] 夏兰廷, 黄桂桥, 张三平, 等. 金属材料的海洋腐蚀与防护 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- XIA Lan-ting, HUANG Gui-qiao, ZHANG San-ping, et al. Marine Corrosion and Protection of Metal Materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.
- [19] SCHUMACHER M. Seawater Corrosion Handbook, Park Rideg [M]. New Jersey: Noyes Data Corporation, 1979.

(上接第 90 页)

- [13] CHEN H, TENG K, LI B, et al. A Research of Solid Rocket Motor Grain Storage Life Forecast Based on Modified Arrhenius Method [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 4: 065.
- [14] 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.
- [15] 周望, 胡滨, 王津梅, 等. 阿伦尼乌斯公式在弹箭贮存寿命评估中的应用 [J]. 装备环境工程, 2011, 8 (4): 1—4.
- ZHOU Wang, HU Bin, WANG Jin-mei, et al. Application of Arrhenius Equation in Storage Life Evaluation of Ammunition [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8 (4): 1—4.