

电子产品加速贮存试验一致性评价方法

徐如远, 张生鹏, 唐宇彬, 倪瑞政, 赵鹏飞

(航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

摘要: **目的** 针对加速贮存试验效果不清晰的问题, 开展电子产品加速贮存试验一致性检验方法研究。**方法** 从模型参数、相关性、理化分析、退化量等 4 个方面对电子产品自然贮存和加速贮存试验的退化轨迹、相关系数、微观损伤、退化速率进行对比分析, 实现定性或定量的一致性评价。**结果** 结合某放大器自然贮存试验和加速贮存试验数据, 利用 4 种方法进行加速试验一致性评价, 给出加速因子的有效性偏差。**结论** 该可有效地对电子产品加速贮存试验一致性进行分析研究, 评估加速系数的有效性, 为寿命评估提供支撑。

关键词: 电子产品; 自然贮存; 加速贮存; 一致性评价; 有效性; 寿命评估

中图分类号: TB114.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)01-0081-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.01.008

Consistency Evaluation Method of Accelerated Storage Test of Electronic Products

XU Ruyuan, ZHANG Shengpeng, TANG Yubin, NI Ruizheng, ZHAO Pengfei

(Aerospace Science and Technology Defense Technology Research and Experiment Center, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: In view of the unclear effect of accelerated storage test, the work aims to study the consistency test method of accelerated storage test of electronic products. The degradation trajectory, correlation coefficient, microscopic damage and degradation rate of the natural storage and accelerated storage tests of electronic products were relatively analyzed from the model parameters, correlation, physical and chemical analysis, and degradation amount, so as to achieve qualitative or quantitative consistency evaluation. Based on the natural and accelerated storage test data of an amplifier, four methods were used to evaluate the consistency of accelerated test and provide validity deviation of acceleration factors. The proposed method can effectively analyze the consistency of accelerated storage test of electronic products, evaluate the effectiveness of acceleration coefficient, and provide support for life evaluation.

KEY WORDS: electronic products; natural storage; accelerated storage; consistency evaluation; effectiveness; life evaluation

贮存寿命、使用寿命是装备可靠性的重要指标要求^[1-3], 当装备已经达到或即将达到使用年限时, 需要开展延寿维修, 增加产品的使用年限^[4-6]。目前主要采取加速试验的方法来确定装备贮存寿命, 装备是多层次多种类产品, 由于加速试验的模拟性以及无状态监测数据支撑的问题, 导致寿命评估存在可信度偏

低的问题, 加速试验的结果能否与实际使用结果取得一致, 成为工程应用中需要迫切解决的问题, 也是制约加速试验工程应用的核心问题之一。

王静等^[7]通过对加速贮存试验与自然贮存试验不一致性的影响因素的分析, 对常用的对比验证技术方法进行了梳理和归类。穆山等^[8]对涂层试验样品开

收稿日期: 2024-06-24; 修订日期: 2024-08-27

Received: 2024-06-24; Revised: 2024-08-27

引文格式: 徐如远, 张生鹏, 唐宇彬, 等. 电子产品加速贮存试验一致性评价方法[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 81-89.

XU Ruyuan, ZHANG Shengpeng, TANG Yubin, et al. Consistency Evaluation Method of Accelerated Storage Test of Electronic Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 81-89.

展了实验室加速试验与自然试验的差异性研究。余淑华等^[9]对丁羟推进剂开展了实验室加速试验与自然试验的差异性研究,得出较低的贮存温度可以延缓推进剂的老化。马同玲等^[10]在完成橡胶产品加速贮存试验后,利用自然贮存数据退化量对试验效果进行了检验。苏承毅等^[11]利用加速贮存退化矢量和自然贮存退化矢量的方向偏差评估试验真实度。冯静^[12]基于秩相关系数对产品退化轨迹的一致性进行了判别。姚军等^[13]、潘晓茜等^[14]、李晓刚等^[15]分别利用灰色理论对退化轨迹一致性进行了判别,刘泓江^[16]采用可靠度拟合优度分析对试验的一致性进行了分析。文献[17-19]分别使用了F统计量、Bartlett统计量结合对数正态分布、Gamma分布及威布尔分布研究了失效机理一致性判别方法。王浩伟等^[20]提出了基于退化模型的失效机理一致性判别方法。郭春生等^[21]基于Arrhenius模型,利用失效敏感参数的退化速率与施加应力的负倒数遵从的数学模型关系进行了序进应力加速试验失效机理一致性判定。鲁相^[22]基于似然比检验原理对橡胶密封件等长寿命产品进行了失效机理一致性分析,并找到了失效机理不变的应力水平边界。李佳锴^[23]通过微观结构分析与加速试验数据2个方面对弹簧加速贮存试验失效机理一致性进行了检验分析。

以上研究表明,产品加速贮存试验一致性分析研究主要集中在试验数据特征或分布的分析和检验方面,部分学者对弹簧等典型结构材料进行了微观分析。然而,由于电子产品内部组成和功能逻辑相对复杂,仅使用试验数据特征或分布类型难以表述自然和加速试验的一致性,此外,加速试验时间和自然贮存年限的等效性研究也相对匮乏。鉴于此,本文从模型参数、相关性、理化分析、退化量等4个方面,系统性地对产品加速贮存试验的一致性检验方法进行概述,给出相应的数学计算方法,并以某放大器作为案例进行分析计算,验证本文所提方法的有效性。

1 产品加速贮存试验一致性检验方法

评估高可靠、长寿命装备的贮存寿命时,通常采用提高应力水平、缩短产品失效时间的方式获取产品的贮存寿命信息,然后根据高应力水平下产品的寿命信息外推正常应力水平下产品的寿命。为了保证统计推断结果的准确性,进行加速贮存寿命试验设计时,必须确保产品在正常应力和高应力下具有相同的失效机理。为保证失效机理一致,在进行产品失效比分析时,需要进行失效机理一致性检验。常用的一致性检验方法主要分为4类:基于模型参数的一致性评价方法、基于相关性的一致性评价方法、基于微观分析的失效机理一致性评价方法、基于退化量的一致性评价方法。

1.1 基于模型参数的一致性评价方法

利用退化轨迹模型开展加速贮存试验数据处理分析时,需要确定产品服从的轨迹模型,若自然贮存试验和加速贮存试验服从的轨迹不一致,计算出的激活能或加速因子也会存在差异,会影响加速试验的真实性和有效性。此外,当激活能保持恒定时,不同轨迹模型对应的加速因子也不同,会对寿命评估结果造成相应的误差。

当前,对于非线性退化轨迹模型的加速寿命试验模型,主要采用QJ 2328等标准规定的方法,这些方法建立在2个假设之上:

假设1 对于大多数具有软故障(即性能退化)的产品,其性能参数指标与试验时间的关系可使用线性、指数或对数模型来进行有效的拟合。

假设2 产品的性能变化速率常数 K 与温度 T 的关系服从Arrhenius方程:

$$K(T) = Z e^{-E_a/RT} \quad (1)$$

式中: T 为热力学温度,K; E_a 为表观活化能,J/mol; Z 为频率因子, d^{-1} ; R 为气体常数,J/(K·mol)。

加速因子一般的定义为产品在加速应力水平与基准贮存应力水平作用下某一贮存寿命特征的比值,即时间之比:

$$A = \frac{t_s}{t_1} \quad (2)$$

由于加速等效性可知,产品经过 t_s 、 t_1 贮存时间后产品退化量一致。针对式(3)~(5)对应的退化轨迹模型,可得到:

$$K_s t_s = K_1 t_1 \quad (3)$$

$$P_0 e^{-K_s t_s} = P_0 e^{-K_1 t_1} \Rightarrow K_s t_s = K_1 t_1 \quad (4)$$

$$P_0 + K_s \ln t_s = P_0 + K_1 \ln t_1 \Rightarrow K_s \ln t_s = K_1 \ln t_1 \quad (5)$$

若性能参数退化轨迹服从线性模型或指数模型,对于给定的加速温度应力 T_1 ,加速因子可表述为:

$$A_F = \frac{t_s}{t_1} = \frac{K_1}{K_s} = \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \quad (6)$$

可以看出,若性能参数退化轨迹服从指数模型,其加速因子评估不随性能退化过程而改变。

若性能参数退化轨迹服从对数模型,对于给定的加速温度应力 T_1 ,加速因子可表述为:

$$A_{F_k} = \frac{t_s}{t_1} = \frac{t_1 \frac{K_s}{K_1}}{t_1} = t_1^{\exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_1} \right) \right] - 1} \quad (7)$$

可以看出,若性能参数退化轨迹服从对数模型,其加速因子评估随性能退化过程而改变,即随着加速贮存试验时间 t_1 延长而改变。

1.2 基于相关性的一致性评价方法

1.2.1 秩相关系数检验法

为分析自然贮存、加速贮存试验获取的性能参数

数据的一致性, 还要对数据的相关性进行分析和评价, 在相关性较好的前提下讨论加速性才有意义。利用 Spearman 秩相关系数 (rhos) 法^[24-26]进行相关性分析。这种方法属于趋势性评价, 方法简单, 实用性强。

装备产品自然贮存试验和加速试验得到的性能参数数据分别为 $P (P_1, P_2, \dots, P_n, n \geq 3, n$ 为装备产品的测试次数) 和 $D (D_1, D_2, \dots, D_n, n \geq 3, n$ 为装备产品的测试次数)。分别按 P 、 D 大小统一排序, 每个数据对应的序数为它的秩, 各设为 P_i 、 D_i , 计算 2 组数据秩差 d_i :

$$d_i = P_i - D_i \quad (8)$$

计算宏观性能退化与微观损伤的秩相关系数 R_{rho} :

$$R_{rho} = 1 - 6 \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2}{n^3 - n} \quad (9)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 。

根据计算得到的秩相关系数, 将其绝对值同临界值进行比较, 可判断两者之间的相关性, 典型秩相关系数临界值见表 1。

表 1 秩相关系数临界值

Tab.1 Critical values of the rank correlation coefficient

N	显著性水平 (单侧检验)			
	0.25	0.1	0.05	0.025
5	0.500	0.800	0.900	1.000
6	0.371	0.657	0.829	0.886
7	0.321	0.571	0.714	0.786
8	0.310	0.524	0.643	0.738
9	0.267	0.483	0.600	0.700
10	0.248	0.455	0.564	0.648
11	0.236	0.427	0.536	0.618
12	0.217	0.406	0.503	0.587

1.2.2 皮尔逊相关系数检验法

皮尔逊分析^[27-28]可用于分析度量两个变量之间的相关性, 比秩相关系数分析更加量化, 且适用于线性模型。将自然贮存试验和加速贮存试验看成线性模型:

$$Y = a + bX \quad (10)$$

相关系数计算公式为:

$$\gamma = \frac{L_{XY}}{\sqrt{L_{XX} \cdot L_{YY}}} \quad (11)$$

式中: $L_{XX} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$; $L_{YY} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$;

$$L_{XY} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$$

利用求得的相关系数 γ 进行相关性检验, 查相关系数表, 查得自由度 $f=n-2$ 对应的 γ_b 值, 并将之与 γ

值进行比较。如果 γ 的绝对值大于 γ_b , 则 X 与 Y 的线性关系成立; 如果 γ 的绝对值小于 γ_b , 则 X 与 Y 的线性关系不成立, 应更换其他老化数学模型。皮尔逊相关系数临界值见表 2。

表 2 皮尔逊相关系数临界值

Tab.2 Critical values of Pearson's correlation coefficient

自由度	置信概率%			
	50	80	90	95
1	0.707	0.951	0.988	0.997
2	0.500	0.8	0.9	0.95
3	0.404	0.678	0.805	0.878
4	0.347	0.608	0.729	0.811
5	0.309	0.552	0.669	0.754
6	0.281	0.507	0.622	0.707
7	0.260	0.472	0.582	0.666
8	0.242	0.443	0.549	0.632

1.3 基于微观分析的一致性评价方法

装备在完成加速贮存试验或例行试验后, 还需开展微观分析, 通过微观损伤分析手段观察元器件、原材料长期贮存后的损伤模式, 与试验前进行对比分析, 并与试验过程中的退化参数进行关联性分析, 对产品失效机理进行直接、客观的判别, 并为贮存寿命评估提供辅助支撑。电子产品微观分析主要包括整机工艺评价、整机焊点评价、电路板评价、元器件评价。一般来说, 微观分析属于定性分析。

1.4 基于退化量的一致性评价方法

典型的产品参数退化曲线如图 1 所示, 产品或设备的失效时间定义为某参数性能退化曲线到达失效阈值的时间 t_{TTF} 。在单退化参数与剩余寿命指标相对应的情况下, 产品的剩余使用寿命此时就可定义为当前时刻与失效时间之间的差值。

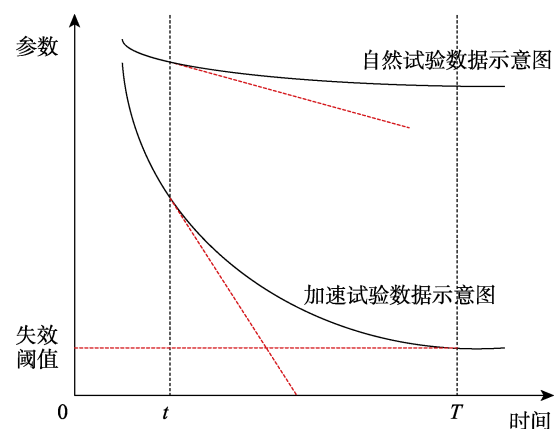


图 1 参数与寿命的关系

Fig.1 Relationship between the parameters and the life

然而由于产品制造工艺的一致性问题的存在,不同产品性能参数的初始值可能存在显著差异,有的产品测试数据起始值就在失效阈值附近,因此若只通过失效阈值来检验加速效果是不够的。考虑到时间与速率成比例关系,因此可以通过速率对比的方式间接得到产品已达到的贮存寿命,从而实现对贮存寿命的验证评价。

加速因子反映的是加速寿命试验中得到的寿命信息与实际使用条件的寿命信息之间的折算规律,定义与公式(2)相似:

$$A_F = \frac{t_{R_0}}{t_{R_i}} \tag{12}$$

式中: t_{R_0} 、 t_{R_i} 表示产品在加速应力水平和正常应力水平下达到相同可靠度的可靠寿命所需时间; A_F 为加速因子。

退化速率是产品重要的寿命特征,也可表示加速

因子:

$$A_F = \frac{\lambda_i}{\lambda_0} \tag{13}$$

式中: λ_i 、 λ_0 表示产品在加速应力水平 S_i 和正常应力水平 S_0 下的退化速率。将试验数据计算得到的加速因子和试验方案设计预估得到的计算因子进行对比,可分析本方法的有效性。

2 案例计算

某放大器是装备控制系统重要中间装置,主要接收各控制信号,进行综合、放大,输出功率信号驱动伺服机构工作。前期已累计自然贮存多年,并选取新投产品开展了 90、100、110、120 °C 等 4 个应力水平的加速贮存试验,完成了加速因子评估,确定“ ψ 波道输入电压 0.995 0 V 时, III 舵输出电流 (+)”为产品的贮存寿命表征参数,相关信息见表 3。

表 3 某放大器贮存寿命表征参数

Tab.3 Storage life characterization parameters of an amplifier

参数名称	技术要求/mA	自然贮存相对退化量/%	加速贮存试验相对退化量/%	激活能/eV
ψ 波道输入电压为 0.995 0 V 时, III 舵输出电流 (+)	-(10±0.2)	5.6	9.4	0.455

2.1 基于模型参数的一致性评价

为验证自然贮存试验和加速贮存试验模型是否一致,对自然贮存产品试验数据进行对比分析,使用“ ψ 波道输入电压 0.995 0 V 时, III 舵输出电流 (+)”进行曲线拟合,得到产品退化轨迹模型拟合结果,见表 4,曲线拟合情况如图 2 所示。

表 4 3 种退化模型相关系数

Tab.4 Correlation coefficients of 3 degradation models

温度条件	线性	指数	对数
常温	0.940 2	0.940 2	0.698 1

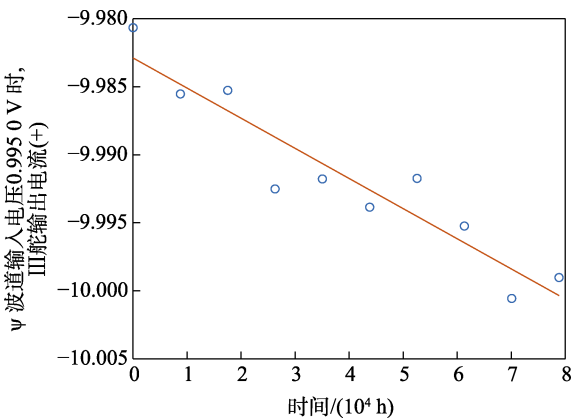


图 2 自然贮存某放大器退化数据拟合情况
Fig.2 Fitting of the degradation data of a natural storage amplifier

对加速贮存试验某放大器产品参数“ ψ 波道输入电压 0.995 0 V 时, III 舵输出电流 (+)”进行分析,得到退化轨迹模型的相关系数结果见表 5,曲线拟合情况见图 3 所示。根据分析计算可知,加速贮存试验和自然贮存试验性能参数退化轨迹均服从线性模型,在模型参数方面具有一致性。

2.2 基于相关性的一致性评价

某放大器加速贮存试验“ ψ 波道输入电压 0.995 0 V 时, III 舵输出电流 (+)”参数的退化曲线如图 4 所示,自然贮存试验“ ψ 波道输入电压 0.995 0 V 时, III 舵输出电流 (+)”参数的退化曲线如图 6 所示。考虑到加速贮存试验和自然贮存试验数据均涵盖多个产品,为避免产品个体差异影响,以每个温度点的平均值进行统计分析。

2.2.1 秩相关系数检验法

利用 Spearman 秩相关系数法,针对加速贮存试验和自然贮存试验数据,分别按其大小统一排序,每个数据对应的序数为它的秩,可得:

$$X_{\text{自然}} = 1,3,2,6,5,7,4,8,10,9$$

$$X_{90} = 1,2,3,4,5,6,9,7,10,8$$

$$X_{100} = 1,3,2,4,5,6,7,8,10,9$$

$$X_{110} = 1,2,3,4,5,7,6,8,9,10$$

$$X_{120} = 1,2,3,4,6,5,8,7,9,10$$

表 5 ψ 波道输入电压 0.995 0 V 时, III 舵输出电流 (+) 3 种相关系数
Tab.5 3 correlation coefficients of III rudder output current when the ψ channel input voltage is 0.995 0 V

温度/℃	产品编号	相关系数 r			相关系数检验
		线性	指数	对数	
90	1#	0.939 7	0.939 7	0.711 4	≥ 0.457
	2#	0.915 4	0.915 3	0.742 1	≥ 0.457
	3#	0.929 7	0.929 7	0.725 9	≥ 0.457
100	4#	0.931 6	0.931 5	0.735 2	≥ 0.412
	5#	0.937 7	0.937 7	0.735 6	≥ 0.412
	6#	0.931 1	0.931 1	0.776 9	≥ 0.412
110	7#	0.954 8	0.954 7	0.742 2	≥ 0.426
	8#	0.930 7	0.930 5	0.813 2	≥ 0.426
	9#	0.918 9	0.918 9	0.717 5	≥ 0.426
120	10#	0.904 6	0.904 5	0.785 8	≥ 0.400
	11#	0.946 0	0.945 8	0.815 3	≥ 0.412
	12#	0.954 5	0.954 3	0.814 6	≥ 0.378
均值		0.932 9	0.932 8	0.759 6	

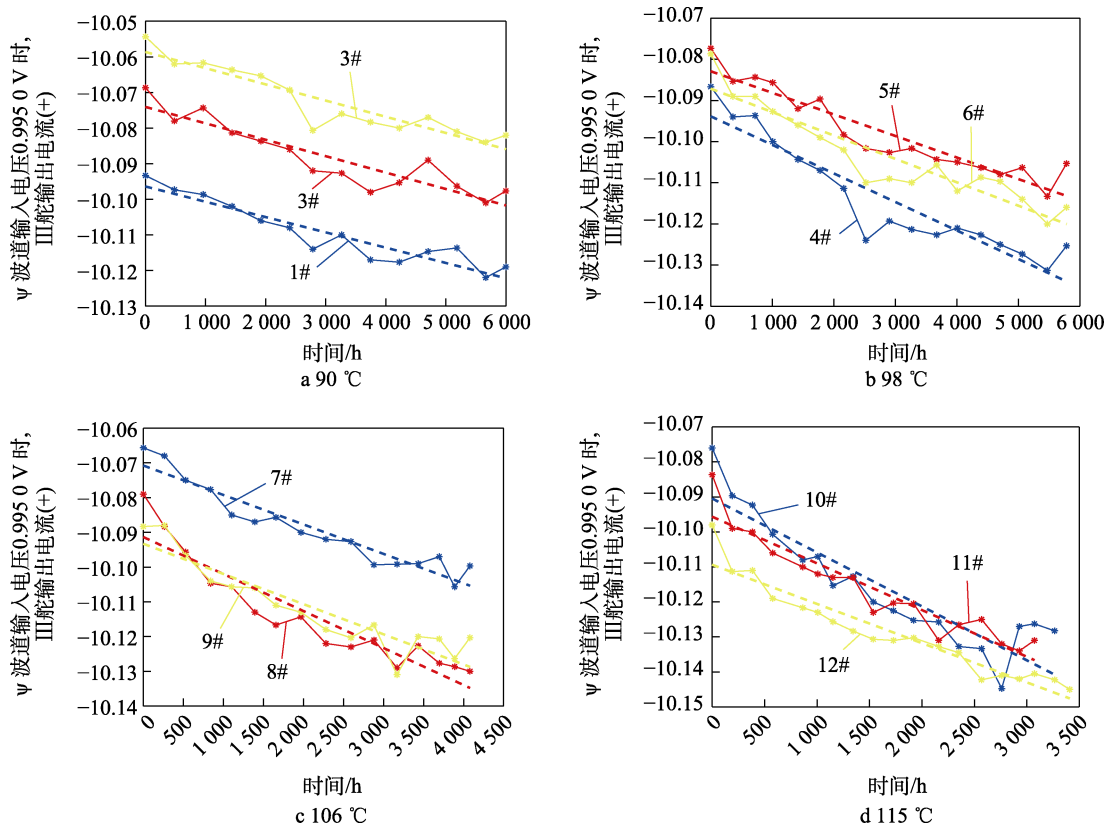


图 3 加速贮存试验某放大器退化数据拟合情况
Fig.3 Data fitting of an amplifier in accelerated storage test

按照公式计算秩相关系数 R_{rho} , 定量评价宏观自然贮存与加速贮存试验的相关性, 相关系数计算结果见表 6。根据计算得到的秩相关系数结果可知, 某放大器自然贮存试验数据和加速贮存试验数据的相关系数均大于 0.648, 具有较高的相关性。

2.2.2 皮尔逊相关系数检验法

秩相关系数只考虑了数据的大小顺序, 并未考虑具体数值。基于此, 利用皮尔逊相关系数对某放大器数据开展计算, 结果见表 7。根据计算得到的秩相关系数结果可知, 某放大器自然贮存试验数据和加速贮存

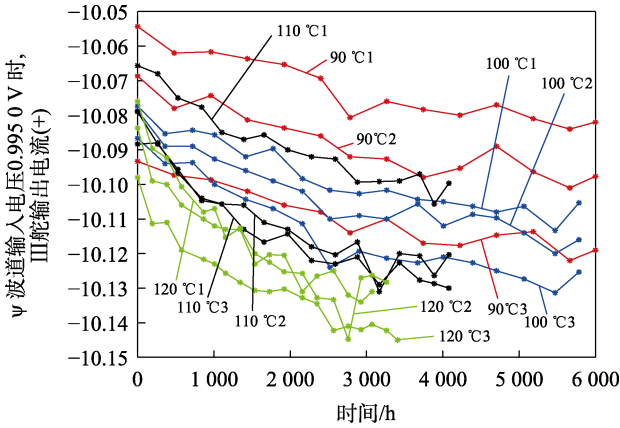


图4 某放大器加速贮存试验参数变化
Fig.4 Change of accelerated storage test parameters of an amplifier

存试验数据的相关系数均大于 0.632, 满足相关性检验要求。

2.3 基于微观分析的一致性评价

根据某放大器进行开盖后工艺分析、板级与元器件检测分析, 形成的微观损伤问题见表 8。印制板三防漆形貌如图 5 所示, 金属膜电阻形貌如图 6~7 所示。根据微观分析存在的问题可知, 加速贮存试验对某放大器的加速效果显著, 并且随着温度的增加, 三防涂层变色更加严重。

2.4 基于退化量的一致性评价

根据前期数据分析结果可知, 不同温度下产品的参数计算值见表 9。考虑到不同产品之间由于服役环

表 6 放大器 3 种退化模型秩相关系数
Tab.6 Rank correlation coefficient of the 3 degradation models of the amplifier

序号	项目	相关系数	相关系数检验	备注
1	90 °C 加速试验与自然贮存试验的秩相关性	0.793 9	≥0.648	
2	100 °C 加速试验与自然贮存试验的秩相关性	0.915 2	≥0.648	显著性水平为 0.025
3	110 °C 加速试验与自然贮存试验的秩相关性	0.927 3	≥0.648	
4	120 °C 加速试验与自然贮存试验的秩相关性	0.818 2	≥0.648	

表 7 放大器 3 种退化模型皮尔逊相关系数
Tab.7 Rank correlation coefficient of the 3 degradation models of the amplifier

序号	项目	相关系数	相关系数检验	备注
1	90 °C 加速试验与自然贮存试验的皮尔逊相关性	0.922 8	≥0.632	
2	100 °C 加速试验与自然贮存试验的皮尔逊相关性	0.919 8	≥0.632	置信概率为 95%
3	110 °C 加速试验与自然贮存试验的皮尔逊相关性	0.937 5	≥0.632	
4	120 °C 加速试验与自然贮存试验的皮尔逊相关性	0.937 5	≥0.632	

表 8 某放大器解剖分析结果
Tab.8 Results of an anatomical analysis of an amplifier

序号	产品编号	试验应力/°C	试验时间/h	存在问题	备注
1	7#、11#	110、120	4 000、3 000	印制板三防涂层存在变色, 正常条件下三防漆应该为透明的浅黄或棕黄色	
2	7#、11#	110、120	4 000、3 000	在长期贮存过程中电阻金属膜层中晶粒或晶界变化, 部分金属膜电阻阻值参数超差	

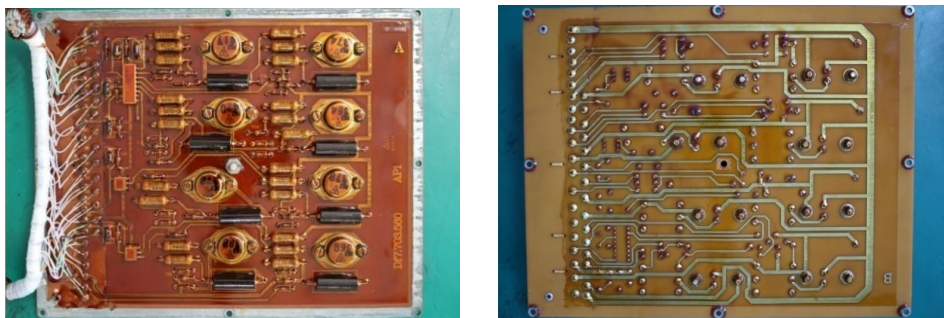


图 5 某放大器印制板三防检查情况
Fig.5 Three-prevention inspection situation of an amplifier printed board



图 6 金属膜电阻典型外观形貌
Fig.6 Typical morphology of metal film resistance



图 7 金属膜电阻典型内部形貌
Fig.7 Typical internal morphology of the metal film resistance

表 9 不同试验温度下各产品的参数计算值
Tab.9 Calculated parameter value of each product at different test temperatures

序号	温度/℃	斜率 k	备注
1	90	$-4.484\ 3 \times 10^{-6}$	加速贮存试验
2	100	$-5.952\ 9 \times 10^{-6}$	加速贮存试验
3	110	$-9.270\ 5 \times 10^{-6}$	加速贮存试验
4	120	$-1.331\ 8 \times 10^{-5}$	加速贮存试验
5	常温	$-2.214\ 8 \times 10^{-7}$	自然贮存试验

境、制造工艺等方面的差异,对同一试验温度每个产品的加速因子取均值用于代表该温度的加速因子。根据激活能参数 0.455 eV 计算不同温度对应基准温度的加速因子,将加速模型计算结果和退化速率计算结果进行对比,结果见表 10。

根据表 10 可知,利用激活能计算出的加速因子和基于实测数据计算出的加速因子结果存在一定的

差异,据分析可能有以下几种原因。

1) 目前只选取了 1 个产品开展自然贮存试验,考虑到产品之间的差异性以及测试仪器的误差,数据退化趋势可能存在误差,影响加速因子评估结果。

2) 产品长期放置于实验室厂房中,由于厂房内温度并不是恒定保持为 25℃,因此以此作为基准温度计算加速因子存在一定的误差。

3) 随着温度的升高,加速因子计算结果误差增大,但相对误差并未随之增加,在开展产品加速贮存试验方案设计时,应综合权衡考虑试验效率和准确性。

温度越高,加速因子计算结果误差越大,因此为获取良好的加速效果,加速贮存试验的温度应尽量贴近实际温度。为确保加速贮存试验的准确性、有效性,在完成加速贮存试验后,应使用自然贮存试验数据对结果进行修正。

表 10 不同温度下各产品的加速因子对比
Tab.10 Comparison of the acceleration factors of each product at different temperatures

基准贮存温度/℃	加速因子				备注
	90℃	100℃	110℃	120℃	
25	23.805 5	35.148 3	50.850 8	72.199 2	激活能计算结果
常温	20.247 0	26.877 8	41.857 1	60.131 8	退化速率计算结果
误差/%	17.6	30.8	21.5	20.1	

3 结语

本文从模型参数、相关性、理化分析、退化量等4个方面,利用所提方法对某放大器加速贮存试验一致性进行计算,并得出以下结论。

1) 在开展产品加速贮存试验一致性评价时,要系统全面地从模型参数、相关性、理化分析、退化量等方面开展一致性分析。

2) 在每个应力水平,应多投放样品开展贮存试验,避免产品之间的差异性以及测试仪器的误差对试验数据造成影响。

3) 产品在全寿命周期会经历各种自然环境因素的作用,为准确评估加速贮存失效的有效性应做好产品贮存环境因素数据的观测和存储管理,便于对比分析。

参考文献:

- [1] 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 S N, HE J D, YAN S Y, et al. Basic Approaches and Key Techniques for Missile Storage Life Extension[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 37-41.
- [2] 孟涛,张仕念. 装备武器装备贮存延寿评述[J]. 科技研究, 2009, 25(1): 10-13.
MENG T, ZHANG S N. Review on the Life Extension of Weapons and Equipment[J]. Scientific and Technological Research, 2009, 25(1): 10-13.
- [3] 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): 94-97.
NIU Y T, MU X H. Research Prospect of Information Ammunition Storage Life Evaluation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 94-97.
- [4] 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 H W, TENG K N, LYU W M. Review on Key Technologies for Missile Storage and Life-Extension Test[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(12): 1004-1016.
- [5] 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 S P, LI H M, ZHAO P F. Accelerated Testing Technology System for Storage Life of Missile Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 92-96.
- [6] 李久祥. 装备贮存延寿技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007.
LI J X. Equipment Storage and Life Extension Technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2007.
- [7] 王静,冯静,杨晋勇,等. 加速贮存与自然贮存对比验证技术研究[J]. 强度与环境, 2015, 42(5): 54-58.
WANG J, FENG J, YANG J Y, et al. The Research on the Comparison Verification between Accelerated Storage and Natural Storage[J]. Structure & Environment Engineering, 2015, 42(5): 54-58.
- [8] 穆山,李军念,王玲. 实验室加速试验与自然暴露试验差异性研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 13-19.
MU S, LI J N, WANG L. Difference between Accelerated Test and Outdoor Exposure Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5): 13-19.
- [9] 余淑华,魏小琴,刘彬,等. 丁羟推进剂库房贮存与加速老化规律研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 31-33.
YU S H, WEI X Q, LIU B, et al. Study of Storage and Accelerated Aging Rule of HTPB Propellant[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 31-33.
- [10] 马同玲,党晓勇,庞明磊. 基于加速老化和自然贮存数据的氟硅橡胶制品贮存寿命预估[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 65-69.
MA T L, DANG X Y, PANG M L. Storage Life Prediction of Fluorine Rubber Products Based on Accelerated Aging and Natural Storage Data[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 65-69.
- [11] 苏承毅,牟春晖,何江,等. 整机级加速贮存试验加速因子与真实度评估方法[J]. 战术导弹技术, 2015(1): 37-41.
SU C Y, MU C H, HE J, et al. Acceleration Factor and Fidelity Assessment of System Level Accelerated Aging Test[J]. Tactical Missile Technology, 2015(1): 37-41.
- [12] 冯静. 基于秩相关系数的加速贮存退化失效机理一致性检验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2439-2444.
FENG J. Consistent Test of Accelerated Storage Degradation Failure Mechanism Based on Rank Correlation Coefficient[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2439-2444.
- [13] 姚军,王欢,苏泉. 基于灰色理论的失效机理一致性检验方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(6): 734-738.
YAO J, WANG H, SU Q. Consistency Identification Method of Failure Mechanism Based on Grey Theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(6): 734-738.
- [14] 潘晓茜,康锐. 基于灰色预测的加速试验机理一致性判定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(6): 787-791.
PAN X Q, KANG R. Identification Method of Failure Mechanism Consistency for Accelerated Testing Based on Grey Forecasting[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(6): 787-791.
- [15] 李晓钢,王亚辉. 利用非等距灰色理论方法判定失效机理一致性[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(7): 899-904.
LI X G, WANG Y H. Identification Method of Failure Mechanism Consistency by Non-Equidistance Grey Theory Model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(7): 899-904.

- [16] 刘泓江. 基于一致性分析的加速试验数据融合建模方法及应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
LIU H J. Accelerated Test Data Fusion Modeling Method and Application Research Based on Consistency Analysis[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [17] 周源泉, 翁朝曦. 对数正态分布环境因子的统计推断[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 18(10): 73-80.
ZHOU Y Q, WENG C /Z/X. Statistical Inferences of Environmental Factors for the Lognormal Distribution[J]. Systems Engineering and Electronics, 1996, 18(10): 73-80.
- [18] 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 X B, WANG J Z, ZHAO Y. Reliability Assessment Using Constant-Stress Accelerated Degradation Data Based on Pseudo Life Distribution[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(1): 228-232.
- [19] 林逢春, 王前程, 陈云霞, 等. 基于伪寿命的加速退化机理一致性边界检验[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(2): 233-238.
LIN F C, WANG Q C, CHEN Y X, et al. Pseudo-Life-Based Test Method of Mechanism Consistency Boundary for Accelerated Degradation Testing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(2): 233-238.
- [20] 王浩伟, 徐廷学, 王伟亚. 基于退化模型的失效机理一致性检验方法[J]. 航空学报, 2015, 36(3): 889-897.
WANG H W, XU T X, WANG W Y. Test Method of Failure Mechanism Consistency Based on Degradation Model[J]. ActaAeronauticaetAstronauticaSinica, 2015, 36(3): 889-897.
- [21] 郭春生, 谢雪松, 马卫东, 等. 加速试验中失效机理一致性的判别方法[J]. 半导体学报, 2006, 27(3): 560-563.
GUO C S, XIE X S, MA W D, et al. A Failure-Mechanism Identification Method in Accelerated Testing[J]. Journal of Semiconductors, 2006, 27(3): 560-563.
- [22] 鲁相, 汪亚顺, 陈循, 等. 基于似然比检验的橡胶密封件加速试验机理一致性判别方法[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(2): 144-149.
LU X, WANG Y S, CHEN X, et al. Identification Method of Mechanism Consistency for Rubber Seals Accelerated Testing Based on Likelihood Ratio Test[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(2): 144-149.
- [23] 李佳锴. 弹簧加速贮存试验失效机理一致性检验方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
LI J K. Study on Consistency Test Method of Failure Mechanism of Spring Accelerated Storage Test[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [24] 曾华波, 张慧霞, 邓春龙, 等. 船体钢室内加速腐蚀和海水腐蚀的相关性研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 8-12.
ZENG H B, ZHANG H X, DENG C L, et al. Study of the Relativity between Indoor Accelerated Test and Sea Water Corrosion Test of Vessel Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 8-12.
- [25] 许欣. 金属装饰涂层耐久性评价方法研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2017.
XU X. Study on the Evaluation Method of Durability of Metal Decorative Coating[D]. Beijing: China General Research Institute of Building Materials Science, 2017.
- [26] 王忠. 黑箱体加速大气暴露试验的相关性与加速性[C]//电子产品可靠性与环境试验技术经验交流会. 乐山: 中国电子学会, 2003.
WANG Z. Correlation and Acceleration of Accelerated Atmospheric Exposure Test in Black Box[C]// Electronic Product Reliability and Environmental Test Technology Experience Exchange Meeting. Leshan: Chinese Society of Electronics, 2003.
- [27] 李慧连, 王文涛, 李莉, 等. 汽车仪表板材料氙灯老化试验与自然曝晒试验相关性研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 30-33.
LI H L, WANG W T, LI L, et al. Study on Correlation between Xenon Lamp Aging and Natural Exposure Methods of Automobile Instrument Panel Materials[J]. Equipment and Environmental Engineering, 2014, 11(1): 30-33.
- [28] 张科, 李娜, 陈宇龙, 等. 裂隙砂岩变形破裂过程中应变场及红外辐射温度场演化特征研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(S1): 95-105.
ZHANG K, LI N, CHEN Y L, et al. Evolution Characteristics of Strain Field and Infrared Radiation Temperature Field during Deformation and Rupture Process of Fractured Sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S1): 95-105.