

装备通用质量特性及寿命评估

薄膜体声波滤波器加速寿命评估技术研究

张俊, 杜波, 徐园园, 刘洋宏, 曾小珊

(中国电子科技集团公司 第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要: **目的** 研究薄膜体声波滤波器的加速寿命评估技术, 针对 XXX1001 型薄膜体声波滤波器进行可靠性寿命评估。**方法** 根据薄膜体声波滤波器设计、结构特点, 针对 XXX1001 型薄膜体声波滤波器典型应用环境条件下的失效模式和失效机理分析, 采用环境影响分析明确寿命表征指标和相应敏感应力, 以此确定合适的加速寿命方法和加速模型。结合可靠性摸底试验确定的敏感应力极限和加速模型要求, 设计加速寿命试验方案, 利用阿伦尼斯模型对寿命表征指标等试验数据进行评估, 得到该型薄膜体声波滤波器的可靠性寿命参数。**结果** 确定了滤波器的寿命表征指标(插入损耗)和敏感应力(温度), 设计了加速寿命试验方案, 试验实施后, 根据试验数据评估出 XXX1001 型薄膜体声波滤波器在 40℃ 工作时的平均寿命为 117 803 h。**结论** 该技术程序较为简单、实施方便、样本少、成本低, 可为类似滤波器的可靠性评估提供参考。其评估结果也可对 XXX1001 型薄膜体声波滤波器的设计改进和应用推广提供技术支撑。

关键词: 敏感应力; 加速寿命; 寿命参数; 阿伦尼斯模型; 可靠性评估

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.07.022

中图分类号: TB535+.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)07-0101-04

Studying on Accelerated Life Assessment Technology of Film Bulk Acoustics Filter

ZHANG Jun, DU Bo, XU Yuan-yuan, LIU Yang-hong, ZENG Xiao-shan
(No. 26 Research Institute of CETC, Chongqing 400060, China)

ABSTRACT: Objective To study the accelerated life assessment technology for the film bulk acoustic filter and evaluate the reliability life for the XXX1001 film bulk acoustic filter. **Methods** According to the design and structural characteristics of the film bulk acoustic filter, the failure mode and failure mechanism of the XXX1001 film bulk acoustics filter under the typical application environmental conditions were analyzed, and the analysis of environmental impact was adopted to make clear the life characterization index and the corresponding sensitive stress, to determine the appropriate accelerated life method and the accelerated model. In combination with the sensitivity stress limit and the requirement of accelerated model, the accelerated life test was designed and the reliability life parameter of this type of film bulk acoustics filter were obtained by evaluating the test data such as the life characterization index with the Arrhenius model. **Results** The life characterization index (insertion loss) and the sensitive stress (temperature) of the filter were obtained. The accelerated life test plan was designed. After testing, in combination with the test data, the average life of XXX1001 film bulk acoustic filter was evaluated to be 117 803 h when working in 40℃. **Conclusion** The technical procedure is simple, easy to implement, with few samples and low cost, which can provide a reference for the reliability evaluation of similar filters. The evaluation results can also provide technical support for the design improvement and application promotion for the XXX1001 film bulk acoustic filter.

KEY WORDS: sensitive stress; accelerated life; life parameter; Arrhenius model; reliability assessment

薄膜体声波滤波器是一种利用压电效应通过声学谐振实现电学选频的器件。具有工作频段宽、体积小、品质因数高、带外抑制好、功率容量大、温度稳定性好以及集成性高等特点,是通信、导航等电子通讯设备中的关键器件,可广泛应用于航天、航空与舰船等国防重点型号工程中。

自1999年美国安捷伦公司的Ruby^[1]等人首次研发成功以来,该技术得到广泛的推广和应用,德国和日本先后研发成功。近几年,随着科研项目的推进和工程经验的累积,中国电子科技集团公司第二十六研究所和天津大学等科研院所也先后成功研制出薄膜体声波滤波器,并陆续应用于各类工程型号和产品系统中。由于其设计难度大、工艺链长且复杂性高等现状,导致目前其可靠性还有较大的提升空间。实际工程应用中,某些滤波器(如XXX1001型薄膜体声波滤波器)的失效也时有发生,极大地影响了配套型号工程的开发进度。为了满足工程应用要求,必须对滤波器的可靠性进行评估,为其工程应用和后续设计、工艺改进提供技术支撑。

目前国内还未见到该类滤波器可靠性评估的报道,胡瑛等^[2]采用统计分析的方法确定了声表面波滤波器的失效分布,刘良芳等人^[3]曾采用经典统计法对声表面波滤波器长期可靠性进行过工程化的评估。由于薄膜体声波滤波器和声表面波滤波器设计和工艺有一定的差异,同时薄膜体声波滤波器的应用和失效数据量稍显不足,采用以上类似方法难以准确评估出该类滤波器的可靠性。为此文中提出采用加速寿命评估技术^[4-5]对该类滤波器(以XXX1001型薄膜体声波滤波器为评估对象)进行可靠性评估,通过采用敏感应力加速的方式加快XXX1001型薄膜体声波滤波器寿命表征指标的退化。根据退化数据,结合相应加速模型,建立加速状态下滤波器的可靠性寿命方程式,通过多个加速状态(根据加速模型未知参数确定)下的寿命方程解算加速模型参数。最后通过加速模型评估XXX1001型薄膜体声波滤波器的可靠性寿命参数。

1 方法与试验实施

1.1 失效模式和相应机理分析

为了明确XXX1001型薄膜体声波滤波器的失效模式和失效机理,必须对其进行结构和功能分析,确定该型滤波器的工作原理以及选用的主要材料等。结合典型应用环境下主要组成部分和材料的故障概率,通过FTA方法确定该型滤波器失效模式和失效机理。

XXX1001型薄膜体声波滤波器主要由顶电极、底电极、压电薄膜和支撑衬底等构成的薄膜体声波谐振器组成^[6],如图1所示。其中顶、底电极进行电信号传输,而压电薄膜进行电声信号转换。在航天、航空应用环境下,针对该型滤波器功能结构开展FTA

分析,以其失效为顶事件,建立故障树分析图,如图2所示。

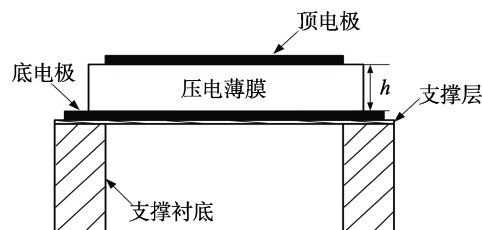
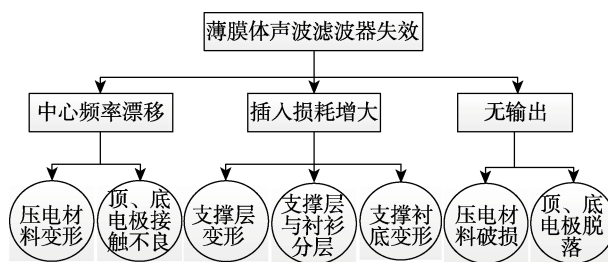


图1 XXX1001型薄膜体声波滤波器用谐振器结构



注：以上事件缺省逻辑关系均为“或门”关系

图1 XXX1001型薄膜体声波滤波器故障树

根据图2中故障树分析可知,该型滤波器在航天、航空环境中可能发生的主要失效模式包括插入损耗增大、无输出以及中心频率漂移等三种主要模式。其中插入损耗增大的失效机理主要有压电薄膜层变形(包括塌陷或膨胀等)、顶电极或底电极电连接不良以及压电薄膜破损等;无输出的失效机理主要为顶电极或底电极脱落、压电材料破损等;中心频率漂移的失效机理主要为压电薄膜材料变形、电极接触不良。由于器件工艺复杂,尤其是压电薄膜和电极生长工艺,其可靠性和稳定性有待加强,因此从成因上可知,滤波器插入损耗增大为主要失效模式。结合2016—2018年该类滤波器失效情况(试验、测试以及使用)统计分析,进一步明确该型滤波器的主要失效模式为插入损耗增大,无输出和中心频率漂移占比较低。

1.2 寿命表征指标和相应敏感应力确定

XXX1001型薄膜体声波滤波器在航天、航空应用环境下的主要失效模式为插入损耗增大,该失效将直接导致滤波器插入损耗超出标称值,引起器件电学信号滤出性能下降,无法正常工作。因此工程上可将插入损耗指标作为该型滤波器的寿命表征指标,即当滤波器的插入损耗在使用或者试验时超出技术要求上限时,视为该型滤波器失效。

根据该型滤波器插入损耗增大时的环境影响分析^[7],结合器件主要组成部分、材料与工艺分析可以确定其相应敏感应力。XXX1001型薄膜体声波滤波器在航天、航空应用期间,主要历经振动、温度、低气压、冲击以及湿度影响。结合该型滤波器结构特点与选用材料,确定其主要的的环境效应见表1。

表 1 典型应用环境的主要效应分析

应力	主要效应	主要机理
振动	机械效应	滤波器顶、底电极脱落；压电薄膜破损
冲击	机械效应	滤波器顶、底电极脱落；压电薄膜破损
温度	材料退化	压电薄膜变形（塌陷或膨胀）；热不匹配顶、底电极电连接失效
低气压	物理化学效应	压电薄膜变形（塌陷或膨胀）；低密度材料的物化性能发生变化；热传导降低而发生过热
湿度	封装表面效应	金属氧化/电化学腐蚀；加速化学反应；水汽与外来附着物相互作用腐蚀
	材料退化	吸收效应引起的膨胀变形；压电薄膜层分层，塑性弹性变形

XXX1001 薄膜体声波滤波器采用的原材料主要包括硅片铝靶^[8]、金丝等。由第 1.1 节可知，该型滤波器的主要失效模式为插入损耗增大。由于该型滤波器为陶瓷封装，工作时低气压和湿度等影响相对较弱。结合表 1 中该型滤波器典型应用下环境效应分析，其主要失效应力为温度，主要失效模式为膜层变形或顶、底电极电连接不良引起的插入损耗增大。膜层变形的失效应力为温度，主要失效机理为温度应力引起的压电薄膜材料变形、电极和薄膜热不匹配导致的电连接不良。

1.3 加速寿命试验设计

根据 1.1、1.2 节中的研究结果，可以确定 XXX1001 型薄膜体声波滤波器在典型应用环境（航天、航空）下主要失效模式为插入损耗增大，工程上可视插入损耗为寿命表征指标，相应敏感应力为温度应力。

在温度应力（规定温度范围-55~125℃）作用下，该型滤波器由于材料或者工艺质量稳定性不足，导致其热不匹配引起的膨胀或收缩影响增大，引起插入损耗增大，超出技术规格（≤1.5 dB），导致器件失效。该过程中器件的失效机理是一致的，符合加速寿命试验技术的理论要求。同时，根据中国电子科技集团公司第二十六研究所的刘良芳、张俊等人^[3]关于声表面波滤波器长期使用失效率统计分析研究可知，无源滤波器的寿命分布一般服从于指数分布，因此在规定的温度范围内，器件的寿命分布是统一的。

根据以上分析，可以采用单应力（温度）步进加速寿命^[9]的试验技术开展该型滤波器待评估寿命试验数据的采集。结合 XXX1001 型薄膜体声波滤波器技术规范要求以及可靠性摸底试验确定加速寿命试验条件。主要包括试验分组、起始条件、终止条件、应力强度变化以及各阶段保温时间等，以便试验能够在较短时间内，保持失效机理的基础上完成既定的试验效果。

为了尽可能准确高效且不改变失效机理地加速该型滤波器在各温度应力条件下的退化，获取滤波器相应应力条件下的可靠性寿命，针对少量（3 只）滤波器开展温度摸底试验来确定滤波器合适的加速试验温度应力。根据摸底试验（高温极限为 165℃，低温极限为-70℃）结果，确定在 90、120、150℃三个温度应力下进行加速试验。根据试验进度和摸底时的退化量，试验时间定为 240 h。根据质量一致性水平和试验成本，试验样品数每组确定为 10 只。

2 结果与分析

按照 1.3 要求，将筛选合格的 30 只 XXX1001 型薄膜体声波滤波器进行电性能测试后分别进行 3 组加速寿命试验。试验后进行电性能检测，30 只滤波器全部均未发生失效。其插入损耗指标见表 2。

表 2 加速寿命试验前后滤波器插入损耗对比 dB

1 组 序号	试验 前	试验 后	2 组 序号	试验 前	试验 后	3 组 序号	试验 前	试验 后
1	1.41	1.41	11	1.39	1.39	21	1.40	1.42
2	1.36	1.37	12	1.36	1.38	22	1.40	1.40
3	1.41	1.45	13	1.43	1.43	23	1.42	1.44
4	1.44	1.44	14	1.40	1.42	24	1.41	1.43
5	1.41	1.41	15	1.36	1.37	25	1.39	1.41
6	1.42	1.39	16	1.40	1.42	26	1.44	1.47
7	1.49	1.47	17	1.46	1.48	27	1.42	1.46
8	1.42	1.42	18	1.38	1.40	28	1.43	1.47
9	1.37	1.39	19	1.41	1.42	29	1.41	1.45
10	1.45	1.45	20	1.40	1.43	30	1.44	1.42

分别对比 3 组试验样品试验前后的插入损耗指标，除了 6 号、7 号、30 号样品外，均符合滤波器在高温加速试验条件下，性能参数退化的趋势。6 号、7 号、30 号样品的插入损耗性能变好的主要原因为：个别压电类器件的相关性能因电老练试验不足未达最佳，而此时的高温加速起到了一定老练的作用。因此可以根据滤波器试验前后寿命表征指标的均值，结合试验时间与技术规格要求（1.5 dB），利用线性外推^[10]评估出 3 组加速试验对应应力条件下的平均寿命，平均寿命 t_1 、 t_2 、 t_3 分别为 9840、1616、960 h。

根据开展加速试验的应力类型，可采用阿伦尼斯模型^[11]来描述该加速寿命试验相关参数关系：

$$t = A \exp\left(\frac{-E}{kT}\right)$$

(1)

式中： t 为平均寿命指标； A 为模型参数； E 为激活能； k 为波尔兹曼常数； T 为热力学温度。

对阿伦尼斯模型进行对数变换可得：

$$\ln t = a + b\left(\frac{1}{T}\right)$$

(2)

式中： a 、 b 为模型参数。

三组试验温度和确定的平均寿命见表3。

表3 试验温度和平均寿命对应表

序号	T/K	$1/T$	t	$\ln t$
1	363	0.002 754 821	9 840	9.194
2	393	0.002 544 529	1 616	7.388
3	423	0.002 364 066	960	6.867

根据表3数据,画出散点图,并根据最小二乘法^[12]得出相应的模型参数 $a=-7.5817$, $b=6027.9$ 。即可得加速寿命方程为:

$$\ln t = -7.5817 + 6027.9 \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3)$$

取滤波器待评估工作温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,即 $T=313\text{ K}$ 时,代入式(3)可得该型滤波器在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工作时的平均寿命为 $117\ 803\text{ h}$ 。

3 结语

采用对器件进行加速寿命试验评估的思路,根据器件 FTA 分析确定的主要失效模式和失效机理,结合环境影响分析,明确器件的寿命表征指标以及对应的敏感应力,确定加速寿命方法和加速模型。结合器件可靠性摸底试验,确定可行的加速寿命试验方案,为工程化评估 XXX1001 型薄膜体声波滤波器提供了可行的技术方案。该方法程序较为简单,实施方便,采用样本少,成本低。通过该方法评估了 XXX1001 型薄膜体声波滤波器的寿命参数,为该型滤波器的应用和改进提供了技术支撑,具有较强的工程应用价值,同时可为

同等类型滤波器可靠性寿命评估提供技术参考。

参考文献:

- [1] 李丽,郑升灵,李丰,等. S波段FBAR滤波器芯片的研制[J]. 压电与声光, 2013, 35(5): 617-619.
- [2] 胡瑛,梅盖华,周毅,等. 声表面波滤波器寿命分布研究[J]. 压电与声光, 2013, 35(3): 312-314.
- [3] 刘良芳,张俊,刘晓琴,等. X454声表面波滤波器可靠性评估方法[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(12): 92-95.
- [4] 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): 29-32.
- [5] 王宇,王欣汝,黄进永,等. 通用电子产品全寿命周期可靠性分析方法[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(1): 40-44.
- [6] 张睿,焦向全,马晋毅,等. 薄膜体声波谐振器的热学分析[J]. 压电与声光, 2016, 38(1): 1-4.
- [7] 刘良芳,张俊,吴畏,等. 光纤声光调制器可靠性强化试验方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018(10): 134-137.
- [8] 陈运详,董加和,司美菊,等. FBAR用氮化铝压电薄膜研究[J]. 压电与声光, 2015, 37(6): 934-936.
- [9] 宣亚龙,陈泽,刘亚超. 红外敏感期加速寿命试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 44-46.
- [10] 甘祖旺. 加速寿命试验在产品变工况下退化数据归一化中的应用研究[J]. 自动化与信息工程, 2015, 36(6): 23-28.
- [11] 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.
- [12] 梁经宛,刘志远,姜帅,等. 长寿命电气二次设备的加速试验方法[J]. 电测与仪表, 2014, 51(10): 39-44.