

红外焦平面探测器杜瓦组件真空寿命分析

林日东, 刘伟, 王冠, 张磊
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:介绍了探测器杜瓦组件的加速寿命试验方法,对用于某机载红外热成像系统长波576×6 HgCdTe 红外焦平面探测器组件的无维护真空寿命进行了分析,结果表明,产品真空寿命超过10年(可靠度为95%),满足产品应用要求。

关键词:探测器组件;真空寿命;寿命加速

中图分类号: TB65; TN215 **文献标识码:** B **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.07.015

Vacuum life analyse of infrared detector & dewar assembly

LIN Ri-dong, LIU Wei, WANG Guan, ZHANG Lei
(North China Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The paper introduces accelerated life testing of integrated detector dewar assembly (IDDA). With this method, the vacuum life of long wave 576×6 HgCdTe IDDA is analyzed. The result indicates that the vacuum life of the product is longer than 10 years (95% reliability), which satisfies the application requirement.

Key words: IDDA; vacuum life; accelerated life testing

1 引言

真空寿命是探测器杜瓦组件(以下简称:IDDA组件)最重要的技术指标之一。作为一种高性能的红外焦平面探测器, HgCdTe 红外焦平面探测器需要在低温(80 K)条件下才能表现出其优异的光电探测性能,因此通常将 HgCdTe 探测器芯片封装在一个微型真空杜瓦内部,配接制冷机(器),以探测器-杜瓦-制冷机(器)组件(以下简称:IDDCA组件)的形式应用在各种红外热成像系统中。在储存或工作条件下,由于微杜瓦内部放气或漏气的原因,真空度逐渐下降, IDDA 组件的静态热负载相应增大,导致制冷机(器)的负载增加。当静态热负载增大到一定程度,制冷机(器)无法正常工作, IDDCA 组件失效,这种由于微杜瓦内部真空度下降导致组件失效的寿命称为真空寿命。为了保证 IDDCA 组件满足工程应用,通常要求 IDDA 组件具有较长的无维护真空寿命,如国内某机载红外热成像系统要

求所采用的长波576×6 HgCdTe 探测器组件(如图1所示)的无维护真空寿命超过10年。



图1 576×6 探测器组件产品

IDDA 的真空寿命分析历来是 HgCdTe 红外焦平面探测器组件化、工程化研究的重要内容。由于

作者简介:林日东(1977-),男,高级工程师,主要从事红外焦平面探测器组件工程化研究。E-mail: dongrilin@126.com
收稿日期: 2011-05-24

要求的寿命时间太长,常规的寿命试验方法已经无法满足 IDDA 组件的真空寿命分析,需要采用加速寿命试验方法。采用加速寿命试验方法,利用先进的实验室数据分析软件 (Reliasoft Weibull + +、ALT7) 作为计算分析工具,对某机载红外成像系统所采用的长波 576×6 HgCdTe 红外焦平面探测器组件 (以下简称: 576×6 探测器组件) 在常温储存条件下的真空寿命进行了分析。

2 加速寿命试验方法

加速寿命试验方法 (accelerated life testing, ALT) 是在不改变试验样品失效模式的前提下,对试验样品施加高于正常使用水平的应力,加速样品提前失效,从而在较短的时间内得出高应力水平下的寿命特征,并以此外推产品在正常使用应力水平下的寿命特征^[1]。对于寿命特征较长的产品,采用常规的寿命试验方法,耗时长,样本数量大,投入成本高,更严重的是产品的可靠度信息不能及时获得从而加以改善。与之相比,加速寿命试验方法可以在较短的时间内获得产品寿命特征的评估,更加适合寿命特征较长的产品。

假设相同的产品,做两组不同应力(加速)水平的试验,可得出两个不同的特征寿命 η_1 (低应力水平) 及 η_2 (高应力水平),则 η_1/η_2 即为加速因子,图 2 为加速寿命的示意图。在相同产品老化程度下,两种试验的时间显然不同,由图 2 可得 T_1/T_2 即为加速因子^[2]。

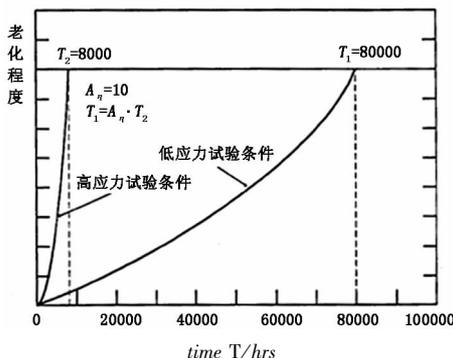


图2 加速寿命试验示意图

根据两组或两组以上不同应力水平的加速寿命试验结果,才能对第三种(或更多种)非试验应力水平相对应加速因子进行计算,从而外推所需应力水平的寿命特征。若温度作为外加应力,且是产品唯一的加速因子,则通常采用 Arrhenius 模型^[3-4]:

$$\eta = C \cdot e^{\frac{E}{kT}} \quad (1)$$

式中, η 为某寿命特征,如中位寿命、平均寿命等; C 为常数,且 $C > 0$; E 为激活能,与材料相关,单位 eV; k 为玻尔兹曼常数, 8.623×10^{-5} eV/K, E/k 的单位是 K,故又可称 E/k 为激活能; T 为温度 (K)。

假设产品在正常温度 T_n 下的寿命特征为 η_n , 加速寿命试验状态的温度 T_a 下的寿命特征为 η_a , 则加速因子 A_η 为:

$$A_\eta = \frac{\eta_n}{\eta_a} = e^{\left(\frac{E}{k}\right)\left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_a}\right)} \quad (2)$$

常温下的寿命特征为:

$$\eta_n = A_\eta \cdot \eta_a \quad (3)$$

加速寿命试验结束后,需要对获得的试验数据进行大量的数值计算,来获得产品在高应力水平下的寿命特征,并利用加速因子外推获得低应力水平下的寿命特征,早期的方法是在概率密度纸上进行拟合获得寿命特征,或通过解方程获得常规应力条件下的寿命特征,这些工作都是通过手动来完成,费时、费力,且分析结果的准确性较差。从 20 世纪 90 年代后期开始,随着计算机技术应用的日趋成熟,国内相关行业开始通过专业的实验室数据分析软件来对加速寿命试验进行分析,取得了良好的效果。本文采用 Reliasoft 公司专业的实验室数据分析软件 Weibull + + 和 ALTA7 来进行 576×6 探测器组件真空寿命分析。

3 IDDA 组件真空寿命加速试验

3.1 IDDA 组件真空失效机理分析

微杜瓦漏气和内表面放气是 IDDA 组件真空失效的两种主要模式。实际研究表明,由于 IDDA 组件的总体漏率较小(通常小于 5×10^{-13} He. atm. cc/s),在杜瓦组件结构不发生物理破坏导致更大漏气情况下, IDDA 组件的漏率对真空寿命的影响较小,内部表面放气是 IDDA 组件真空失效最主要的原因。

封装在微杜瓦内部的探测器芯片及微杜瓦零部件在大气环境下溶解、吸附了一些气体^[5],当完成探测器封装后, IDDA 组件内部是一个微型的真空腔室,微杜瓦内表面和所封装的探测器会逐渐释放出所溶解、吸附的气体,放气的速率除了与材料性质、制造工艺、预处理(如:清洗、烘烤、气体放电轰击、表面处理等)有关外,环境温度是影响放气速率

的重要因素:

$$q = q_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

式中, q 为放气速率; q_0 为常数; E 为活化能; R 为气体普适常数; T 为环境温度(K)。

由式(4)可知, 温度越高, 材料的放气率越大。对材料进行真空、高温烘烤放气后, 材料表面总吸附气体脱附很多, 当材料降至室温, 材料的放气率可以明显降低。但由于所封装的碲镉汞探测器特性决定了组件排气烘烤温度不可能太高(通常不超过 $90\text{ }^\circ\text{C}$), 导致 IDDA 组件在常温条件下有不可忽略的放气, 这是影响 IDDA 组件真空寿命的主要因素。而且储存温度越高, 放气率越大, IDDA 组件真空寿命明显降低。因此可以利用储存温度作为加速应力, 进行 IDDA 组件真空寿命加速试验(以下简称加速寿命试验)。

3.2 576×6 探测器组件加速寿命试验设计

3.2.1 加速寿命试验总体设计

试验设计以《GB 2689.1-81 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则》^[6] 为依据, 图 3 是 576×6 探测器组件加速寿命试验的流程图。

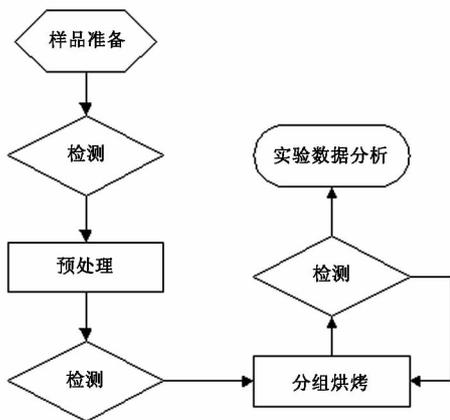


图3 576×6 探测器组件加速寿命试验流程

(1) 以储存温度作为加速应力, 采用恒应力加速寿命试验方法;

(2) 最高储存温度低于 576×6 探测器组件排气烘烤温度, 确保失效机理不发生改变;

(3) 以静态热负载增加 20% 作为 576×6 探测器组件真空失效的唯一判据;

(4) 试验中间过程对样品不进行任何维护, 考核 576×6 探测器组件的无维护真空寿命。

3.2.2 样品准备

576×6 探测器组件样品准备遵循以下原则:

(1) 所有样品采用同一批次的原材料和零部件, 采用相同的制造工艺, 连续几个批次完成样品制造, 排气烘烤温度为 $83\text{ }^\circ\text{C}$;

(2) 所有的样品技术指标完全符合产品规范要求, 且有较好的一致性;

(3) 所有的样品都按产品的环境试验要求进行预处理, 预处理条件包括: 高温储存、低温储存、温度冲击、正弦振动、随机振动、机械冲击、离心加速度等;

(4) 预处理结束后再次进行测试, 剔除早期失效和性能指标变化较大的样品, 从技术指标合格且预处理前、后各项技术指标变化小于 20% 的样品中随机抽样作为试验样品。

3.2.3 试验参数设计

3.2.3.1 应力水平确定

(1) 应力水平数: 4 个;

(2) 最低储存温度: $T_1 = 60\text{ }^\circ\text{C}$;

(3) 最高储存温度: $T_4 = 77\text{ }^\circ\text{C}$;

(4) 应力水平间隔:

$$1/T_2 = 1/T_1 - \Delta; 1/T_3 = 1/T_1 - 2\Delta$$

其中, $\Delta = (1/T_1 - 1/T_4)/(4 - 1)$ 。

经计算可得: $T_2 = 65\text{ }^\circ\text{C}$; $T_3 = 70.5\text{ }^\circ\text{C}$

3.2.3.2 样品数量

高应力组样品数量比低应力组样品数量多, 具体如表 1 所示。

表 1 各组应力水平和样品数量

样品组	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组
储存温度/ $^\circ\text{C}$	60	65	70.5	77
样品数量/个	9	11	14	16

3.2.3.3 样品检测

(1) 每次检测采用相同的设备仪器, 采用相同的检测方法, 由相同的人员进行测试, 减少设备和人为因素的影响;

(2) 测试周期的长短与产品的实效分布、施加应力的有关, 根据《GB 2689.1-81 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则》, 温度应力低的样品组测试周期比温度应力高的样品组长, 试验开始阶段和结束阶段测试周期短; 因每组的样品数相对较少, 尽量避免在一个测试周期内发生 2 个以上样品失效的情况, 测试周期根据试验过程实际测试情况作相应的调整;

(3) 若某个测试周期内失效数 r_k 为零, 则本次

周期不计算累计失效概率;

(4)若同一个测试周期内失效数 $r_k \geq 2$,则相应于此 r_k 个失效时间的累积;

(5)失效概率分别计算;

(6)考虑到产品测试所需的时间和需要回温稳定的时间,确定样品从高温储存设备中取出进行测试到再次投入样品继续进行烘烤的时间不超过 48 h。

3.2.3.4 失效标准

(1)以静态热负载的增加超过 20% 作为 576 × 6 探测器组件的唯一失效标准;

(2)在试验过程中,对 576 × 6 探测器组件的技术指标进行全面检测,如样品发生破坏或明显存在失效机理的改变,则该样品直接剔除,不计入本次试验统计。

3.2.3.5 试验停止时间确定

高温储存的失效数尽可能多,低温(60 °C)组至少 30% 失效,试验停止。

4 试验结果及分析

4.1 试验结果总体情况

2009 年 11 月到 2010 年 2 月间,采用相同的工艺,分 12 个批次完成了 576 × 6 探测器组件样品 68 个,通过预处理剔除早期失效 4 个,在 64 个合格样品中随机抽取 50 个样品,分 4 组进行高温烘烤老化试验,中间定期进行静态热负载和其它技术指标测试,试验时间从 2010 年 4 月开始到 2011 年 5 月结束,总体试验情况如表 2 所示。

表 2 试验结果总体情况

样品组	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组
储存温度/°C	60	65	70.5	77
样品数量/个	9	11	14	16
失效总数/个	4	4	4	15
失效率	44%	36%	28.5%	94%
第 1 个样品失效测试时间/h	5485	5317	3201	3713
试验结束时间/h	9910	8369	7824	5899

4.2 分析情况

利用寿命数据分析软件 Weibull++ 和寿命加速试验分析软件 ALT7,对试验获得的 IDDA 组件真空失效试验数据进行分析。

(3)打开 ALT7,将 4 组样品的失效时间输入表单(如图 4 所示),通过各种分布拟合计算,确认样品失效时间分布服从威布尔分布;

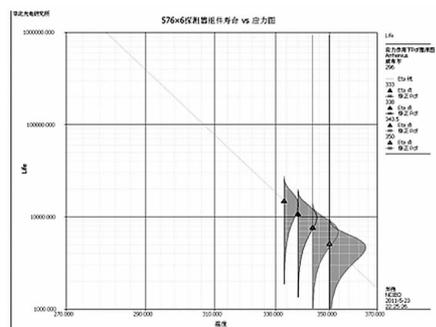
数量	最近检查时间	FTS 状态	结束时间	温度 K
1	4719	F	5485	333
2	6325	F	7302	333
3	9263	F	9910	333
4	9910	S	9910	333
5	4430	F	5317	330
6	7292	F	7796	338
7	8040	S	8040	338
8	8369	S	8369	338
9	4036	F	4965	343.5
10	6788	F	7322	343.5
11	7824	S	7824	343.5
12	3100	F	3540	350
13	3540	F	4480	350
14	4480	F	4820	350
15	4820	F	5060	350
16	5060	F	5366	350
17	5899	S	5899	350

图 4 样品失效时间

(4)图 5 为威布尔分布的主要参数。通过软件计算,可得 576 × 6 探测器组件的寿命特征,图 6 为常温储存条件下(23 °C)组件的平均真空寿命,分析结果为 211750 h,合计 24.17 年;



图 5 威布尔分布拟合主要参数



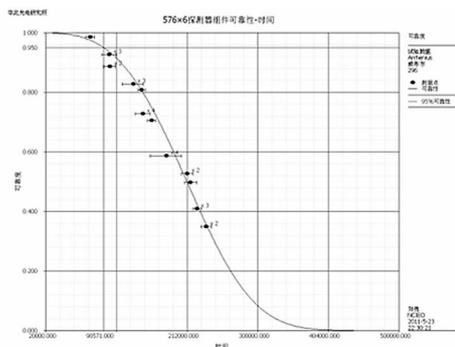
(a)



(b)

图 6 576 × 6 探测器组件平均真空寿命(296 K)

(5)图7为常温储存条件下 576×6 探测器组件可靠度为95%的真空寿命,分析结果为98571 h,合计11.25年。



(a)



(b)

图7 576×6 探测器组件95%可靠度的真空寿命(296 K)

5 结论与分析

(1)以储存温度作为加速因子,进行真空寿命加速试验,并利用专业的实验室数据分析软件对试验结果进行分析的方法,对于其他型号探测器-杜瓦组件真空寿命的分析同样适合;

(2)用于某机载红外热成像系统的长波 576×6 HgCdTe 红外焦平面探测器组件产品无维护真空寿命为11.25年,可靠度为95%;达到产品10年无维护真空寿命的要求;

(3)本次试验第1、2、3组样品失效数较少,目前这三组样品还在继续烘烤老化,后续将对获得的

数据继续分析,可以预计,产品真空寿命分析结果大于11.25年。

参考文献:

- [1] Zhang Zhihua. The presentation and statistical analysis of accelerated life test [M]. Beijing: The Publishing Company of Beijing University of Technology, 2002. (in Chinese)
张志华. 加速寿命试验及其统计分析 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2002.
- [2] Zhang Fuxue. The constant stress life test and accelerated life test of electronic component [J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 1985, 1: 56-82. (in Chinese)
张福学. 电子元器件的恒应力寿命试验和加速寿命试验 [J]. 压电与声光, 1985, 1: 56-82.
- [3] Liu Jing, Lu Changzhi. Comparison of accelerated life tests of electronic component [J]. Semiconductor Technology, 2006, 31(9): 680-683. (in Chinese)
刘婧, 吕长志. 电子元器件加速寿命试验方法的比较介绍 [J]. 半导体技术, 2006, 31(9): 680-683.
- [4] Mao Shisong, Wang Lingling. Accelerated life test [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2000, 5. (in Chinese)
茆诗松, 王玲玲. 加速寿命试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2000, 5.
- [5] Yu Xiaobing. Analysis of dewar thermal isolation and high vacuum lifetime [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4): 275-278. (in Chinese)
于小兵. 微型杜瓦绝热和真空保持分析 [J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 275-278.
- [6] The National Standard Office. 1981. GB 2689.1-81. The General Principle of Constant Stress Life Test and Accelerated Life Test [S]. Beijing: Standards Press of China, 1981. (in Chinese)
国家标准总局. 1981. GB 2689.1-81 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1981.