

文章编号: 1672-8785(2013)02-0010-06

红外微型杜瓦真空退化特性研究综述

张亚平 刘湘云

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘 要: 分析了导致真空失效的漏放气因素。通过超高灵敏度检漏技术, 可以严格控制漏气对真空寿命的影响。用功率形式的放气模型 $q(t) = q_0(t/t_0)^{-\alpha}$ 描述了杜瓦真空夹层的放气率退化特性。用温度加速了杜瓦真空夹层内的真空退化进程。用阿列尼斯模型 $q = q_0 \exp(-E/RT)$ 描述了温度对材料放气率的影响。根据理论分析和放气率实验, 可确定出加速因子。

关键词: 红外探测器; 微型杜瓦; 真空寿命; 放气模型; 加速老化

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.02.02

Review of Vacuum Degradation in Infrared Detector Micro-Dewar

ZHANG Ya-ping, LIU Xiang-yun

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Factors resulting in vacuum failure are analyzed. The influence of leakage on the vacuum lifetime of a Dewar can be controlled strictly by using an ultrahigh sensitivity leakage detection technology. The outgassing decline characteristics in the vacuum jacket are described by using the outgassing model in the form of power i.e. $q(t) = q_0(t/t_0)^{-\alpha}$. The vacuum decline process in the vacuum jacket of the Dewar can be accelerated by means of temperature. The influence of temperature on the outgassing rate of material is described by using the Arrhenius model $q = q_0 \exp(-E/RT)$. The acceleration factor can be determined according to the results of theoretical analysis and outgassing experiment.

Key words: infrared detector; micro-dewar; vacuum life; outgassing mode; accelerated aging

0 引言

随着二代红外焦平面探测器组件的发展, 组件的全生命周期花费成为重要的考虑因素, 而可靠性则是红外探测器杜瓦制冷机组件 (Integrate Detector Dewar Cooler Assembly, IDDCA) 的主要技术指标。由于目前广泛应用的指数模型并不适合用来评估红外探测器杜瓦制冷机组件的可靠性, 所以需要发展专门用于评估组件的可靠性方法。IDDCA 由制冷机、杜瓦真空、红外焦平面

三个主要亚模块组成, 任何一个亚模块的失效都会导致整个组件的失效, 所以 IDDCA 是一种串联模型^[1,2], 其可靠性框图见图 1。IDDCA 的可靠性是分模块可靠性的乘积, 即 $R_{IDDCA} = R_{制冷机} \times R_{杜瓦真空} \times R_{杜瓦连接} \times R_{红外焦平面}$ 。杜瓦真空的好坏会影响制冷机的转速, 从而影响制冷机的可靠性, 因而也会影响整个组件的可靠性。

红外探测器杜瓦组件是匹配红外芯片和制冷机的关键电真空器件。一方面, 杜瓦组件的冷耗必须小以减少对制冷机的要求, 从而间接提高

收稿日期: 2012-12-20

作者简介: 张亚平 (1986-), 男, 云南曲靖人, 在读硕士研究生, 主要从事杜瓦真空封装及可靠性研究工作。

E-mail: yp722.good@163.com

制冷机的可靠性。另一方面, 杜瓦组件在整个寿命周期内必须保持良好的真空度, 以防真空度变差使窗口起雾或使制冷机无法制冷到红外芯片的工作温度而导致组件失效。



图1 可靠性框图

杜瓦是组成探测器的基本构件, 它含有双层结构的薄壁容器。通常内胆由玻璃或金属制成, 结构如图2所示。杜瓦内层称为冷指芯柱, 前端的金属元件座(基板)用于装载探测器芯片, 冷指芯柱内部用于安装制冷机。杜瓦的外壳(上套)装有透红外窗口, 冷指芯管和杜瓦上套的真空夹层内布有电信号引出线, 夹层中安装有消气剂^[3]。

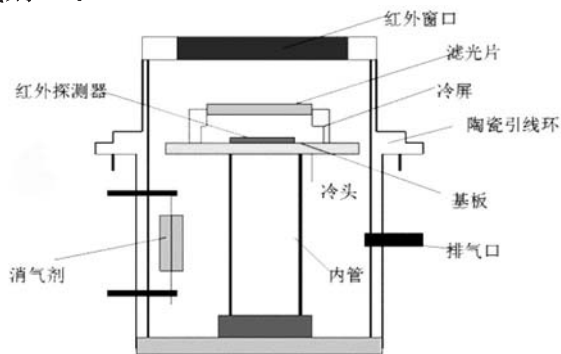


图2 杜瓦结构示意图

1 杜瓦夹层真空退化主次要因素分析

杜瓦组件在排气封离后, 真空度会随时间的增加而慢慢变差, 主要原因有两个: 一方面是引线烧结、焊缝、芯片胶接等部位的微漏; 另一方面是真空夹层材料的放气。若真空度变差使窗口起雾或使制冷机无法制冷到红外芯片的工作温度, 则组件失效, 导致红外热像仪或红外寻的器不能工作。

漏气率可以通过用超高灵敏度检漏仪严格筛选加以控制, 图3为超高检漏原理图。

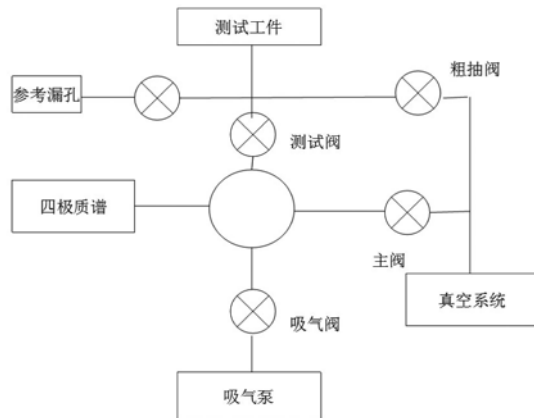


图3 超高检漏示意图

在超高检漏过程中, 用真空泵系统抽真空至 1.5×10^{-5} Pa, 然后打开吸气阀并关闭主阀, 靠吸气泵维持高真空。用质谱仪测量检漏工质氮气的分压强, 累积测量3分钟。此时信号上升, 得到背景信号上升率 S_{bg} 。打开主阀抽走累积气体后关闭主阀, 使用氮工质1个大气压作示漏气体罩在工件上, 同样累积测量3分钟, 待氮气分压信号上升后, 得到罩氮信号上升率 S_{hh} 。由此可得出工件的漏气率:

$$Q_{wp} = (S_{hh} - S_{bg})Q_{st}/S_{st} \quad (1)$$

式中, Q_{st} 为标准漏孔的漏气率, S_{st} 为标准漏孔的信号上升率^[4]。

美国量子机械公司通过四极质谱仪通过静态累积获得了 1×10^{-14} Pa L/s 的最小可检漏率, 结果满足杜瓦瓶微漏率的检测要求。

在实际应用中, 器件是处在大气环境下的, 考虑到微漏及器件内外压强差很大, 须对漏率做如下转换:

$$\frac{Q_{He}}{Q_{atmosphere}} = \sqrt{\frac{m_{atmosphere}}{m_{He}}} = 2.7 \quad (2)$$

杜瓦内表面的放气率难以准确测定, 是因为产品冷剪后的放气率与排气工艺、材料表面处理工艺等密切相关。另外, 杜瓦封装的 HgCdTe 红外探测器芯片耐不住长时间高温烘烤, 而高

温冲击又需严格控制时间, 所以会导致难以充分排气^[3]。

单纯从漏气角度考虑其对真空寿命的影响。排气结束后真空度很小, 可以忽略不计。失效标准为 0.1 Pa, 夹层体积为 26 mL ($2.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3$)。表 1 列出了漏气率和寿命的关系。

表 1 寿命与漏气率的关系

漏气率 (对大气)	寿命 (年)
$1.0 \times 10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	8.2
$1.0 \times 10^{-15} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	82.4
$1.0 \times 10^{-16} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	824.5

从以上的分析可以看出, 杜瓦的制造工艺完全可以控制漏气率, 使其低于设计值。超高灵敏度检漏技术可以保证出厂的每一只杜瓦的漏气率。

Kullberg R. C. 等人用内部气体分析方法 (HR-IVA) 分析了 INO 公司产品长时间贮存后夹层内的残余气体^[5]。结果表明漏气与放气相比, 夹层材料的放气才是导致内部气体压力升高的主要因素^[6]。所以, 漏气不是影响杜瓦真空寿命的主要因素, 需关注放气对杜瓦真空贮存寿命的影响。

2 杜瓦真空退化失效分布函数

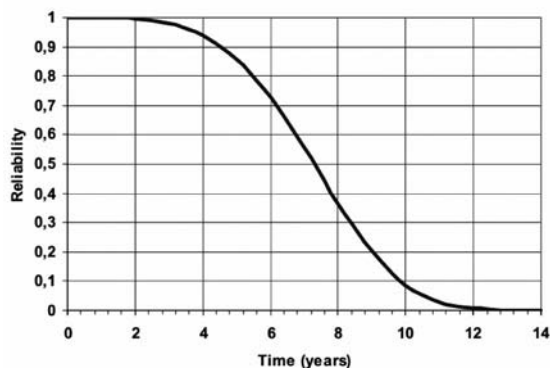


图 4 高温环境下的真空可靠性

Sofradir 公司在高温贮存条件下获得的杜瓦真空可靠性结果如图 4 所示^[7]。由图 4 可知, 放气是真空退化的主要原因。在无维修的情况

下 (无激活消气剂操作), 平均无故障时间 MTTF 大约是 8 年。

假设投入 100 个同种型号、相同制作工艺的杜瓦组件做恒温贮存实验, 根据表 1 数据可反推出恒温贮存实验的实验结果 (见表 2)。

表 2 Sofradir 公司仿真实验数据

间隔开始时间	最新检查时间	累计失效样品数	间隔内失效数
0	2	0	0
2	4	6	6
4	6	28	22
6	8	62	34
8	10	91	29
10	12	99	8
12	14	100	1

上面的实验结果可利用 Weibull 软件进行分析。该软件提供的失效数据分布形式有 Weibull 分布、正态分布、对数正态分布、指数分布、G-Gamma 分布、Gamma 分布、Logistic 分布、Loglogistic 分布和 Gumbel 分布等。在对实验数据做拟合分析后, 利用 QCP 计算工具可得到相应的可靠性结果。表 3 至表 6 为 Weibull 分布和指数分布的计算结果 (全部计算过程采用相同的置信度 0.9)。

分析表明, 两参数 Weibull 分布形式最符合实验最初的可靠性结果。故杜瓦真空失效数据应该采用两参数 Weibull 分布函数来描述。

3 放气退化模型的选择

3.1 工程用材料放气经验模型^[8]

3.1.1 指数模型

设 m 为某时刻材料的质量, m_0 为材料初始质量, $\dot{m}$ 为材料放气速率。假设该材料只放出一种污染物, 且放气速率与材料剩余质量有如下关系:

$$\dot{m} = k \cdot (m_0 - m)^n \quad (3)$$

式中, n 为反应阶数, 对于一般的非金属材料, $n=1$ 。 $k = k_0 e^{-E/RT}$, 其中 k 为速率常数, k_0

为常数, E 为激活能, T 为温度。由式 (3) 和 (4) 可得:

$$m = m_o \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

$$\dot{m} = km_0 e^{-kt} \quad (5)$$

由此质损工程经验模型为指数模型, 其具体形式为:

$$m = ae^{-bx} + c \quad (6)$$

表 3 三参数 Weibull 分布的计算结果

分布形式		三参数 Weibull 分布 $\beta = 3.1673, \eta = 6.2710, \gamma = 0.6638(RRX, FM, RRM, K - M)$						
时间 (年)		2	4	6	8	10	12	14
可靠度		0.9926	0.8733	0.5489	0.1933	0.0294	0.0015	1.8234E-5
		-						

表 4 两参数 Weibull 分布的计算结果

分布形式		两参数 Weibull 分布 $\beta = 3.5693, \eta = 7.0137(MLE, FM, RRM, K - M)$						
时间 (年)		2	4	6	8	10	12	14
可靠度		0.9959	0.9384	0.7298	0.3750	0.0938	0.0077	0.0001
		-						

表 5 指数分布的计算结果

分布形式		指数分布 $\lambda = 0.4498, \rho = -0.7362$						
时间 (年)		2	4	6	8	10	12	14
可靠度		0.4068	0.1655	0.0673	0.0274	0.0111	0.0045	0.0018
		-						

表 6 两参数指数的计算结果

分布形式		两参数指数分布 $\lambda = 0.7136, \gamma = 4, \rho = -0.9101$						
时间 (年)		2	4	6	8	10	12	14
可靠度		-	1	0.24	0.0576	0.0138	0.0033	0.0008
		-						

3.1.2 双指数模型

根据弱键降解理论, 对扩散方程定解问题, 取

$$f(x, t) = R \cdot \exp(-Kt) \quad (7)$$

式中, $f(x, t)$ 表示由于材料本体降解使体内扩散物浓度随时间的变化, R 表示零时刻的 $f(x, t)$, K 为由材料和具体降解过程决定的降解因数。通过推导及简化, 可得质损量 $W(T, t)$ 随温度和时间变化的函数关系, 称为质损双指数理论。

$$W(T, t) = N[1 - \exp(-\alpha t)] + M[1 - \exp(-Kt)] \quad (8)$$

3.1.3 其他常用拟合经验模型

除了前述指数模型和双指数模型外, 其他常用的拟合模型有:

$$m = a \cdot t^b + c \quad (9)$$

$$m = \alpha \cdot \ln(t) + b \quad (10)$$

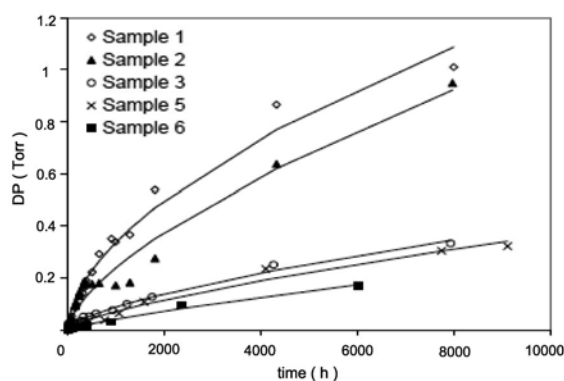
式 (9) 是材料中多种成分解吸及扩散现象的经验模型, 而式 (10) 是污染物从表面大量解吸现象的经验模型。

3.2 夹层真空退化效应

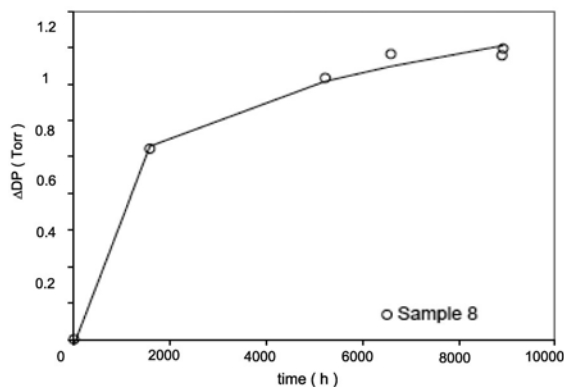
INO 公司对 MEMS 产品做过类似夹层真空退化效应方面的工作。9 个不同样本的具体情况见表 7^[9]。其中样品 9 内部装有可吸附水汽和二氧化碳的消气剂,该消气剂可在低温下工作。实验结果如图 5 所示。

表 7 恒温实验样品描述

样本	描述
1	短时清洗, 5 分钟烘烤, 80 ℃ 贮存
2	短时清洗, 5 分钟烘烤, 80 ℃ 贮存
3	长时清洗, 5 分钟烘烤, 80 ℃ 贮存
4	长时清洗, 2 小时烘烤, 80 ℃ 贮存
5	长时清洗, 4 小时烘烤, 80 ℃ 贮存
6	长时清洗, 65 小时烘烤, 80 ℃ 贮存
7	长时清洗, 65 小时烘烤, 60 ℃ 贮存
8	长时清洗, 17 小时烘烤, 25 ℃ 贮存
9	长时清洗, 65 小时烘烤, 80 ℃ 贮存

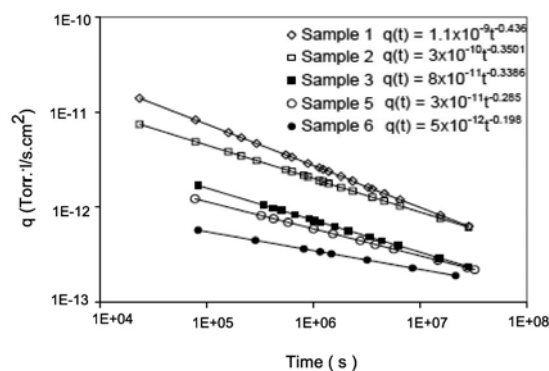


(a)

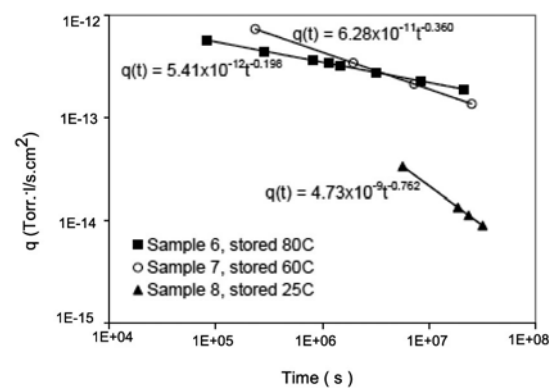


(b)

图 5 压强随时间变化的关系图



(a)



(b)

图 6 放气率随时间变化的关系图

采用功率形式的放气模型:

$$q(t) = q_o \left(\frac{t}{t_o} \right)^{-\alpha} \quad (11)$$

对数据进行处理后得到放气率随时间的变化规律,如图 6 所示。

对放气率进行积分可得到压强变化规律:

$$p(t) = p_o + \left(\frac{A}{V} \right) \frac{q_o}{1 - \alpha} (t^{1-\alpha} - 1) \quad (11)$$

拟合不同样品的数据,得到的相关参数值见表 2。

将放气率结果等效成相当的漏气率。由拟合结果可知,常温 25℃ 的放气率可等效为 2.5×10^{-14} (Torr · L)/s 的漏气率, 80℃ 下的放气率可等效为 4.8×10^{-13} (Torr · L)/s 的漏气率。由此推出加速因子约为 17。

表 8 拟合实验结果

样品	1	2	3	5	6	7	8
q_0	1.13×10^{-9}	2.52×10^{-10}	7.89×10^{-11}	3.05×10^{-11}	5.41×10^{-12}	6.28×10^{-11}	4.73×10^{-9}
α	0.436	0.350	0.338	0.285	0.198	0.36	0.760

4 温度的加速退化效应

法国 Sofradir 公司通过恒温贮存实验对热负载变化进行了跟踪 (热负载超过 25% 作为真空失效判据)^[10,11]。11 只杜瓦在 80°C 温度下存储 405 天后无一失效, 7 只杜瓦在 100°C 温度下存储 100 天后无一失效。当温度增加 10°C 时, 材料的放气速率变为原来的 2 倍, 即放气加速因子为 2, 由此推出杜瓦在 40°C 温度下真空寿命可达 18 年。

温度对真空贮存寿命的加速作用可通过对真空夹层材料出气率的加速作用来间接反映, 通常可以用阿伦尼乌斯模型来描述^[12], 即:

$$q = q_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (12)$$

式中 q 为材料的出气率。

真空夹层内的压强增加, 本质上是因为夹层材料放气, 从微观角度看则是因为夹层内分子数目在增加。根据不同温度下的放气率测试可确定温度的加速效果。

5 结论

漏气不是影响杜瓦真空寿命的主要因素, 夹层材料的放气才是导致内部气体压力升高的主要因素。需关注放气对杜瓦真空贮存寿命的影响。两参数 Weibull 分布函数适用于描述杜瓦真空失效数据。

建立杜瓦真空寿命加速试验的数学模型时, 有必要量化影响杜瓦真空寿命的各种因素, 特别是要对真空夹层材料放气情况进行合理描述。真空夹层材料的放气是影响杜瓦真空寿命

的主要因素, 真空夹层中放气率的试验测定及放气率模型的合理选择可明确温度的加速退化特性。

参考文献

- [1] Molina M, Brenière X, Tribolet P. IR Detector Dewar and Assemblies for Stringent Environmental Conditions[C]. *SPIE*, 2007, **6542**:1–11.
- [2] Brenière X, Manissadjian A, Vuillermet M, et al. Reliability Optimization for IR Detectors with Compact Cryo-coolers[C]. *SPIE*, 2005, **5783**:187–198.
- [3] 崔军生, 贾卫民. 红外探测器工作寿命的影响因素分析[J]. *航空兵器*, 2011, (5):39–42.
- [4] 朱颖峰, 卢云鹏, 李海英等. 金属杜瓦瓶微小漏率检测[J]. *红外与激光工程*, 2001, **30**(2):143–146.
- [5] Kullberg R C, Rossiter D J. Measuring Mass Flows in Hermetically Sealed MEMS and MOEMS to Ensure Device Reliability[C]. *SPIE*, 2008, **6884**: 68840-L.
- [6] Lowry R K, Kullberg R C. Examining Internal Gas Compositions of a Variety of Microcircuit Package Types and Ages with a Focus on Sources of Internal Moisture[C]. *SPIE*, 2009, **7206**: 06.
- [7] Brenière X, Tribolet P. IR Detectors Life Cycle Cost and Reliability Optimization for Tactical Applications[C]. *SPIE*, 2006, **6395**:13.
- [8] 焦子龙, 星用有机材料放气速率模型研究 [C]. 第三届空间材料及其应用技术学术交流会议论文集, 2011.
- [9] García-Blanco S, Topart P, LeFoulgoc K, et al. Hybrid Wafer-level Hermetic Micropackaging Technology for MOEMS-MEMS[C]. *SPIE*, 2009, **7206**:02.
- [10] Brenière X, Tribolet P. IR Detectors Design and Approach for Tactical Applications with High Reliability without Maintenance[C]. *SPIE*, 2008, **6940**:0H.
- [11] Chorier P. Sofradir MCT Technology for Space Applications[C]. *SPIE*, 2009, **7330**:07.
- [12] 于小兵. 微型杜瓦绝热和真空保持的分析[J]. *激光与红外*. 2004, **34**(4):275–278.