

文章编号: 1672-8785(2008)03-0011-05

# 微型杜瓦组件真空加速寿命试验的研究

张亚妮, 朱三根, 龚海梅

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘 要:** 微型杜瓦封装是红外焦平面探测器组件的封装形式之一, 而真空寿命则是红外焦平面杜瓦组件的关键技术指标之一。通过分析影响杜瓦真空寿命的因素, 建立了适合微型杜瓦真空寿命的加速试验模型, 确定了其加速应力和水平, 并用实验数据的统计分析方法对杜瓦的真空寿命可靠性分布作了进一步的估计。

**关键词:** 微型杜瓦; 真空寿命; 加速寿命试验

**中图分类号:** TN305.5 **文献标识码:** A

## Research on Vacuum Life of Micro Metal Dewar

ZHANG Ya-ni, ZHU san-gen, GONG Hai-mei

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** A micro Dewar package is one of the packaging forms of an infrared focal plane detector assembly and the vacuum life is one of the key technical parameters of the Dewar assembly for an infrared focal plane detector. In this paper, the factors affecting the vacuum life of a Dewar is analyzed. An accelerated vacuum life test model suitable for micro Dewars is established and its accelerated stress level is determined. Finally, the reliability distribution of the vacuum life of a micro Dewar is further estimated by using an experimental data statistical method.

**Key words:** micro metal Dewar; vacuum life; accelerated life test

### 1 引言

微型杜瓦是红外焦平面与斯特林制冷机相耦合的重要部件, 能为红外探测器提供良好的光学、机械、电学、热学通道, 也是红外焦平面探测器的封装和保护装置。为了提高红外探测器的灵敏度, 一般要使其工作在深低温, 这就要求杜瓦必须保持一定的真空度。当真空度下降到一定程度时, 由残气对流换热导致的热负载会急剧增加, 而当热负载增加到一定程度时, 制冷机提供的制冷量就无法满足探测器深低温工作的要求, 红外焦平面探测器也就无法工作。同时, 杜瓦内的残气会凝结在探测器表面, 使得探测器的性能衰退甚至丧失<sup>[1]</sup>。由此可以看出,

真空寿命是红外焦平面微型杜瓦组件的关键技术指标。真空寿命的研究方法一般有真空寿命跟踪测试法和加速寿命试验法。真空寿命跟踪测试法是在正常的应力水平下进行试验, 其获得的真空寿命指标比较准确和客观, 但它存在失效时间比较长的缺点。加速寿命试验是在超过正常应力水平下进行试验, 由于它采用加速应力, 缩短了试验时间, 提高了试验效率, 降低了试验成本, 使高可靠、长寿命产品的研制成为可能, 因而被广泛应用<sup>[2]</sup>。但国内外针对红外焦平面杜瓦组件真空加速寿命试验的研究文献报道较少。

### 2 影响杜瓦真空寿命的因素

**收稿日期:** 2007-10-08

**作者简介:** 张亚妮(1979—), 女, 陕西宝鸡人, 助理研究员, 在职申位硕士, 多年从事红外探测器结构封装及可靠性研究。

微型杜瓦(见图1)的真空寿命主要由漏率、排气、杜瓦材料放气以及消气剂吸气量等综合因素决定。漏率主要取决于高气密焊接工艺的质量,因此控制好焊接工艺非常重要。有文献报道<sup>[1]</sup>,在杜瓦容积为18ml并装有消气剂时,如果只考虑漏率的条件,对于 $10^{-2}$ Pa的终止真空度,杜瓦的真空寿命如表1所列。排气工艺主要决定杜瓦刚从排气台上冷夹封下来的起始真空度,因而在高真空排气过程中,应尽量提高排气过程中的温度并延长排气时间<sup>[4]</sup>,尽量使吸附在真空室内表面的气体排出去,以降低排气完成后的真空腔内表面残余气体的出气量。上述两个因素在杜瓦的研制过程中应得到严格控制。杜瓦材料的放气是影响杜瓦真空寿命的最主要因素。零部件在装配过程中会吸附一些气体,当其处于真空环境时就会因解析而出气,从而导致杜瓦内残余气体增加。杜瓦一般都装有消气剂,消气剂通过激活可以有效地吸收部分残余气体,但其吸附量是有限的。

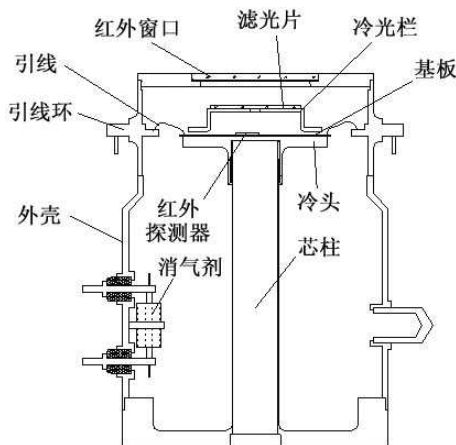


图1 典型红外焦平面杜瓦结构的示意图

表1 漏率与真空寿命的对应关系

编号	氦漏率 Pa.lHe/s	真空寿命
1	3.5E-12	120年
2	5.67E-9	27天
3	1.16E-11	36.4年
4	1.20E-10	3.52年
5	3.77E-10	409天

### 3 杜瓦真空的加速寿命试验方法

#### 3.1 杜瓦真空加速寿命模型的建立

美罗姆航展中心1967年首次给出了加速寿命试验的统一定义<sup>[2]</sup>:加速寿命试验是在进行合理工程及统计假设的基础上,利用与物理失效规律相关的统计模型对在超出正常应力水平的加速环境下获得的可靠性特征的可靠性的数值估计的一种试验方法。加速寿命试验的内容有试验的最优设计和统计分析两大问题,统计分析优于最优设计。只有建立起数据处理的统计方法之后,才能解决如何估计得更准的问题。

加速寿命试验的模型主要有阿伦尼斯模型、单应力艾林模型、逆幂律模型、广义艾林模型、指数模型和多项式加速模型<sup>[6]</sup>。表2列出了其加速应力的确定和应用场合。从表中可以看出,以温度为加速应力的模型主要有阿伦尼斯模型和单应力艾林模型。在忽略其它影响真空因素和不安装消气剂的情况下,材料放气是影响杜瓦真空寿命的重要因素。存放时间越长,杜瓦的真空度越低。由费克定律可知,如果提高杜瓦的烘烤温度,材料的放气速率越大,杜瓦内的真空度越差,残气引起的热传导越大,杜瓦的真空寿命也就越短,因此应选定温度作为杜瓦真空寿命的加速应力。

表2 常用加速寿命试验模型比较

名称	加速应力选取	应用场合
阿伦尼斯模型	温度	电子元器件、绝缘材料等
单应力艾林模型	温度	电子元器件、绝缘材料等
逆幂律模型	电应力	电子元器件
广义艾林模型	温度和电压	电子元器件
指数模型	电压	电容器
多项式加速模型	多应力	传感器等

杜瓦材料的放气类型有蒸发、渗透和解吸三种。由于杜瓦的材料主要是金属,其饱和蒸汽压比较小,蒸发导致的残余气体增加可以忽略。对杜瓦而言,渗透主要有氢渗透和氦渗透两种类型。由于氢气和氦气在空气中的百分含量极

低, 一般也可以忽略。而解吸则是杜瓦放气的最主要来源。气体解吸速率的计算公式如下:

$$\frac{d\sigma}{dt} = -Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1)$$

式中,  $\frac{d\sigma}{dt}$  为解吸速率,  $A$  为一常数, 其与平均居留时间和振动周期有关。从此公式的分析可以看出阿列尼斯模型比较适合杜瓦真空寿命的加速寿命试验。

采用阿列尼斯方程作为寿命与温度关系的模型<sup>[7]</sup>, 其数学表达式为

$$\frac{dM}{dt} = Ae^{-\frac{E}{KT}} \quad (2)$$

式中,  $\frac{dM}{dt}$  为化学反应速率,  $K$  为玻耳兹曼常数,  $E$  为激活能,  $T$  为绝对温度,  $A$  为常数。当把它应用在化学反应中时, 它与温度的关系有一个经验公式。具体表达如下:

$$\lg t = a + b\left(\frac{1}{T}\right) \quad (3)$$

式中,  $t$  为寿命时间,  $T$  为绝对温度,  $a$  和  $b$  为两个常数。

### 3.2 杜瓦真空寿命的加速应力的实施

失效物理研究表明, 温度(加速应力)与某些可靠性指标(如平均寿命、中位寿命等)间存在一些关系。如果选用温度作为加速应力, 在高温下获得的各种可靠性特征量就可以用来外推工作温度下的可靠性指标。加速寿命试验中的应力施加方法主要有恒定应力加速寿命试验(简称恒加试验)、步进应力加速寿命试验(简称步加试验)和序进应力加速寿命试验(简称序加试验)三种<sup>[8]</sup>。这三种方法的优缺点比较见表 3。从表 3 中可以看出, 恒定应力加速寿命试验的理论成熟, 比较适合微型杜瓦真空寿命的加速寿命试验。

恒定应力加速寿命试验的概念为, 在一批产品中随机抽取  $n$  只样品, 并将其分为  $k$  组。每组样品在某个恒定加速应力下接受寿命试验, 直到各组均有一定数量的样品发生失效为止。在微型金属杜瓦的加速真空寿命试验中采用恒

加试验(见图 2), 并同时采用截尾样本下恒加试验的评估技术。

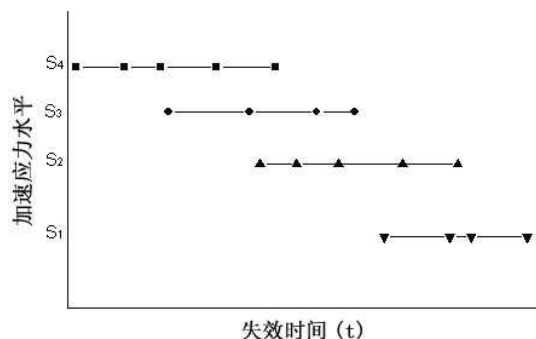


图 2 恒定应力加速寿命试验示意图

### 3.3 微型杜瓦真空加速寿命试验的设计

#### 3.3.1 加速应力的选择

加速应力的个数至少为 4 个,  $T_1 = 343\text{K}$ ,  $T_4 = 473\text{K}$ , 采取倒数等间隔,  $T_2 = 378\text{K}$ ,  $T_3 = 421\text{K}$ , 则四个加速应力的水平分别是  $70\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $148\text{ }^\circ\text{C}$  和  $200\text{ }^\circ\text{C}$ 。

#### 3.3.2 试验样品的选择<sup>[9]</sup>

在同一批杜瓦产品中随机抽取出样品, 然后将它们随机分为 4 组, 每组数量不少于 4 个, 可以相等也可以不相等, 而且低应力水平下的试验样品数不应少于高应力水平下的试验样品数。

#### 3.3.3 测试方法及周期的确定

如需直接测量杜瓦瓶内的真空度, 则需在杜瓦瓶内安装微型真空规来监测真空度的变化, 测量范围是  $10^{-1}\text{Pa} \sim 10^3\text{Pa}$ 。也可以通过用液氮蒸发测量杜瓦冷损的办法来监测杜瓦内真空的变化, 但这种方法比较费时费力, 测量结果也存在误差。所以在实验中应根据情况把这两种方法结合起来使用。

### 3.4 杜瓦真空加速寿命试验的数据处理

寿命试验的统计分析方法是加速寿命试验统计分析方法的基础, 它与寿命分布类型密切相关。威布尔分布是广泛应用的一种寿命分布, 它的最大特点是其形状参数  $m$  的不同能反映各种不同的失效机理<sup>[10]</sup>。

恒加试验数据的统计分析方法基本假定有三点:

- (1) 产品在各应力水平下的分布服从威布尔

表 4 累积失效时间和累积失效概率统计

次序号	1	2	3	...	n
失效时间 $t_i$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	...	$t_i$
累积失效概率 $F(t_i)$	$1/(n+1)$	$2/(n+1)$	$3/(n+1)$	...	$i/(n+1)$

分布, 其分布函数为

$$F_i(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta_i} \right)^{n_i} \right] \quad (4)$$

式中,  $i$  取值为 1、2、3、4;  $\eta_i$  为特征寿命,  $t$  为时间;

(2) 各应力水平下的产品失效机理不变, 即  $m$  为常数。

(3) 产品的特征寿命  $t_i$  与所加应力水平  $S_i$  有如下加速模型:

$$\ln t_i = a + b\phi(S_i) \quad (5)$$

这三个假定的验证方法如下: (1) 假定 1 的检验可利用威布尔概率纸进行; (2) 假定 2 的检验用巴特利检验法或作图检验法进行, 由失效物理作背景; (3) 假定 3 的假设是肯定的。

下面阐述前两个假定的检验方法。

对试验数据的处理按照下面的办法进行; 在样品数量少于 25 的情况下, 失效概率为  $F(t_i) = \frac{i}{n+1}$ 。在每个温度点的累积失效时间和累积失效概率统计见表 4。

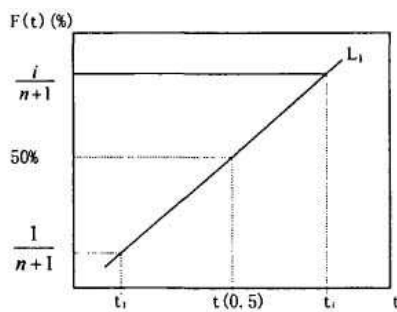


图 3 中位寿命取值图

对每个温度点下的一组数据, 在威布尔分布概率纸上绘出概率和失效时间的分布图, 取得中位寿命值 (见图 3), 在单对数坐标上绘制中位寿命和温度的关系曲线 (见图 4), 由作图法求得阿乌尼斯模型的两个形状参数, 再求出加速

因子。若所示四条线都是直线, 则假定 1 成立。若四条直线平行, 则假定 2 成立 (见图 5)。

如图 5 所示, 在威布尔概率纸上绘制数据点, 估计中位寿命点。在单边对数坐标纸上画出寿命  $t$  与温度  $T$  的关系图, 由式 (3) 可知, 它是一条直线, 称为加速寿命直线, 可以用最小二乘法比较精确地估计系数  $a$  和  $b$ 。由式 (3) 得出加速系数为

$$\tau_{T_i \rightarrow T_0} = 10^{b \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_i} \right)} \quad (6)$$

式中,  $T_0$  为正常应力水平。根据加速系数可以求出正常条件下的真空寿命。

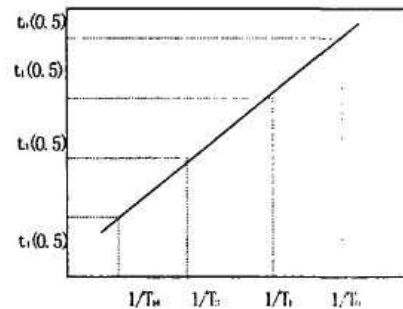


图 4 典型中位寿命与温度的关系曲线

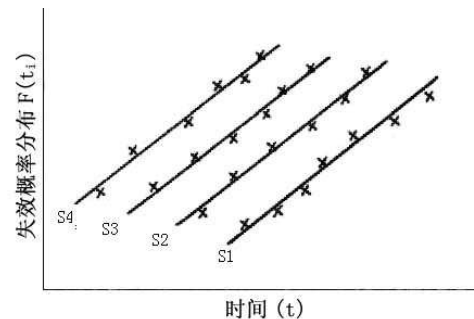


图 5 假定 2 检验图

## 4 结论

本文通过对影响杜瓦真空寿命的因素的分析, 探讨了适合微型杜瓦真空寿命加速试验的模型和种类, 重点阐述了微型杜瓦加速寿命试验的研究方法, 包括加速应力的确定、加速应力

水平、试验样品和测试方法和周期等的优化设计。简要阐述了实验数据的统计分析处理方法, 从理论上系统地阐述了微型杜瓦加速寿命可靠性的研究方法。这有利于推动红外焦平面微型杜瓦组件可靠性方面的基础研究, 对推进红外探测器杜瓦组件的工程化应用有重要意义。

### 参考文献

[1] 朱颖峰, 卢运鹏, 李海英, 等. 金属杜瓦瓶微小漏率检测 [J]. 红外与激光工程, 2001, 3(2): 143-154.  
 [2] 张春华, 温熙森, 陈循. 加速寿命试验技术综述 [J]. 兵工学报, 2004, 25(4): 485-488.

[3] 葛树平, 朱颖峰. 红外焦平面杜瓦排气残余气体分析实验研究 [J]. 红外技术, 2006, 28(5): 293-298.  
 [4] 茆诗松. 加速寿命试验的加速模型 [J]. 质量与可靠性, 2003, 33(4): 15-17.  
 [5] 黄燕, 吴全信. 阿列尼乌斯模型在红外微型金属杜瓦的真空寿命试验中的应用 [J]. 低温与超导, 2005, 33(2): 69-72.  
 [6] 茆诗松. 从寿命试验到加速寿命试验 [J]. 质量与可靠性, 2003, 33(4): 8-12.  
 [7] 周源泉, 朱新伟. 论加速可靠性增长试验 (VIII) 试验的组织与实施 [J]. 推进技术, 2003, 24(6): 481-483.  
 [8] 陈文华, 程耀东. 威布尔分布下恒定应力加速寿命试验的优化设计 [J]. 浙江大学学报, 1999, 33(4): 337-342.

## 国外专利介绍

### 高发射率红外涂层及其在悬停红外抑制系统中的使用

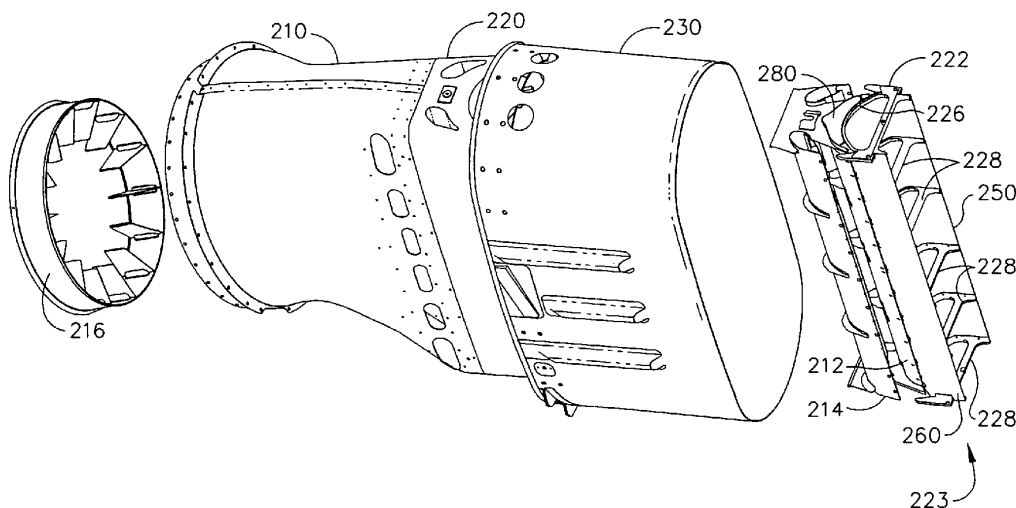
美国专利 US7313909  
 (2008 年 1 月 1 日授权)

本发明提供一种专门用在悬停红外抑制系统 (HIRSS) 的排气挡板上的高发射率红外涂层。HIRSS 是用来减弱直升机发动机的红外特征的。随着直升机

发动机的工作温度的不断增加, HIRSS 已变得不太有效。而通过在 HIRSS 的某些部位上涂覆红外涂层, 则可以减弱该系统的红外辐射。

本发明提供的高发射率涂层由 30% ~ 80% 耐高温氧化颜料、5% ~ 20% 粘合剂、1% ~ 15% 氧化钾、约 15% 玻璃成形材料以及耐高温氧化粉末构成。当给 HIRSS 涂覆该涂层并使其表面光洁度达到 1100R<sub>a</sub> 微英寸或者更粗糙时, 该 HIRSS 在红外谱区的半球面反射率就可以大大降低。

本专利说明书共 16 页, 其中有 10 张插图。



高 编 译