

基于朗缪尔吸附模型的杜瓦真空寿命评估研究

范 崔^{1,2,3}, 王小坤^{1,2*}, 季 鹏^{1,2}, 张 磊^{1,2}, 俞 君^{1,2}, 沈一璋^{1,2}, 莫德锋^{1,2}, 李 雪^{1,2*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:影响杜瓦真空寿命的主要是内部材料出气。针对红外探测器杜瓦的出气机理及密封前需长时间排气特点, 提出了以满足朗缪尔吸附模型的脱附速率方程作为杜瓦出气率模型的真空寿命评估方法。创新性地提出排气结束时变温监测离子流的方法, 获得同覆盖度下不同温度的出气率, 消除覆盖度的影响, 提取了杜瓦的整体出气激活能, 推导出存储温度下初始出气率及出气率随时间变化的关系。实验发现三个杜瓦在不同测试条件下获得的激活能差异为 8.8%。跟踪封装 2 年的杜瓦热负载, 验证估算的寿命误差为 7.2%。为小批量、多样化杜瓦提供了便利的真空寿命无损检测评估方法。

关键词: 红外器件; 杜瓦; 真空寿命; 出气率; 脱附激活能

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

A Dewar vacuum lifetime estimate based on Langmuir adsorption model

FAN Cui^{1,2,3}, WANG Xiao-Kun^{1,2*}, JI Peng^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}, YU Jun^{1,2}, SHEN Yi-Zhang^{1,2},
MO De-Feng^{1,2}, LI Xue^{1,2*}

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The main factor affecting the vacuum life of the infrared detector Dewar is the internal material outgassing. The Langmuir adsorption model outgassing equation is used to calculate the vacuum lifetime due to the outgassing mechanism and the long-term degassing procedure of the Dewar. An innovative method of changing the temperature at the end of the degassing procedure was proposed to obtain the outgassing activation energy. The outgassing rate was measured at different temperatures while simultaneously removing the influence of coverage on the outgassing rate. The outgassing rates at storage temperature and the rule of outgassing rate changing over time were deduced. The difference among the three Dewar outgassing activation energies obtained in different conditions was 8.8%. The heat load of the Dewar was tracked for two years to verify the method. The estimated error of Dewar's vacuum lifetime was 7.2%. It is a non-destructive testing estimation method for the vacuum life of small and diverse Dewar.

Key words: infrared detector, Dewar, vacuum lifetime, outgassing, activation energy

引言

随着红外探测需求向长波和高灵敏度发展, 红外探测器在深低温下才能工作, 主动式制冷机红外

组件有结构紧凑、功耗低、降温速度快等优点, 使得该类型红外探测器组件在航空航天领域有着广泛的应用^[1]。主动式红外制冷组件杜瓦内必须保持一

收稿日期: 2022-10-25, 修回日期: 2023-04-20

Received date: 2022-10-25, revised date: 2023-04-20

基金项目: 上海市优秀学术/技术带头人计划资助(21XD1404200); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-CN-2019-3)

Foundation items: Supported by Shanghai Academic/Technology Research Leader under Grant (21XD1404200), Key deployment projects of the Chinese Academy of Sciences (ZDRW-CN-2019-3)

作者简介 (Biography): 范崔 (1989-), 女, 江西宜春人, 博士生, 主要研究领域为红外探测器封装与集成技术。Email: fancui@mail.sitp.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: lixue@mail.sitp.ac.cn; wxk-sitp@mail.sitp.ac.cn

定的真空度来维持工作,由于材料固有的放气特性,随着时间的推移,杜瓦内真空度会不断下降。当真空度下降到一定程度时,残气对流换热导致杜瓦热负载急剧增加,使得探测器组件功耗增加。当热负载增加到一定程度后,制冷机提供的冷量无法满足探测器深低温工作的要求,使得探测器组件的性能衰退。也就是说杜瓦真空度的变化将影响到整个探测器的维护成本、光电性能、使用寿命^[2],即真空寿命是红外探测器杜瓦重要的技术指标。

影响杜瓦内真空的因素主要包括渗透、焊缝微漏以及内部材料蒸发、出气。筛选合格的杜瓦组件,杜瓦内材料出气为主要的来源。常见的真空寿命计算方法为先对杜瓦内部所用材料单位面积的出气速率进行表征后,结合各材料的暴露面积进行计算,即可得到杜瓦的总出气率随时间的变化关系。根据杜瓦的热负载变化来确定杜瓦的终止压强,从而获得杜瓦的真空寿命。由于新型杜瓦使用的材料多样、且组装时无法避免引入表面污染、封焊时出气状态不定,导致这种方法的变量太多^[3],实际计算困难。因此,Sofradir曾给出一个杜瓦真空寿命计算方法,温度每增加10℃,出气率翻倍,即真空寿命减半,通过测试同批次杜瓦温度加速寿命来估算正常存储温度下的真空寿命^[4],但此方法较为粗略。工信部5所测试不同存储温度下杜瓦的热负载随时间的变化来获得其真空寿命,并采用阿伦尼斯(Arrhenius)模型来描述杜瓦的真空寿命函数,可获得不同温度下杜瓦的真空寿命^[5]。此方法需要的样本数目多,无法用于杜瓦数量小、结构多样的应用场合。考虑到常见制冷型红外探测器杜瓦组件在完成封装前需长时间真空烘烤排气,排气时的出气率能够反映杜瓦因材料和工艺造成的整体出气水平及其走势。通过排气过程中杜瓦真空监测获得杜瓦的整体出气率,基于满足朗缪尔吸附模型的脱附速率方程,采用变温出气率测试的方法来提取杜瓦整体出气的激活能,并根据模型得到不同温度下初始出气率及出气率随时间变化的关系,再据此评估杜瓦的真空寿命。该方法适用于具有多样性的小批量杜瓦,且该试验不会损失样品性能,为无损测试。

1 红外探测器杜瓦出气特性

1.1 杜瓦出气分析

焊接合格的杜瓦,材料出气为杜瓦内主要的气体来源,材料出气的原因是材料表面吸附气体的脱

附和内部溶解气体的扩散解溶^[6]。首先考虑表面气体的脱附,只有气体分子获得的能量超过其脱附激活能才有可能从材料表面上脱附,根据脱附激活能与气体的表面覆盖度的关系,常用朗缪尔吸附模型或焦姆金吸附模型来进行分析;而在扩散解溶为主要出气来源的情况下,需要根据材料外形使用菲克第一定律对出气率进行求解^[7]。可以看出材料的出气规律比较复杂,根据计算与实际情况,可以得到材料出气率随时间变化的经验公式(1),式中 q 为出气率, t 为时间, q_0 和 α 为与材料特性有关的常数^[8]。

$$q = q_0 t^{-\alpha} \quad (1)$$

在真空系统中,吸附剂材料表面不均匀,表面各个位置的活性不同,活性最大也即激活能低的粒子先脱附,所以激活能随着排气时间增加而增大,即激活能是一个与表面覆盖度有关的函数。一般材料出气过程总结分为三个阶段,第一个阶段是具有低结合能的物理吸附气体,如果表面光滑,这个阶段只持续很短的时间,第二个阶段是中结合能的化学吸附,主要是水分子和有机物,第三阶段是由材料体内扩散到表面的气体,在低温下脱附速率很低,对真空度没有什么影响^[9]。为保证杜瓦内部的真空度,最终封焊前通常会对杜瓦进行真空除气。受到探测器可靠性的影响,杜瓦排气温度的不高,且杜瓦存储一般在室温,观察到的出气现象主要为中结合能的化学吸附物质的脱附。

在排气结束时段,材料表面气体的覆盖度低,考虑吸附是单分子层,且被吸附分子之间无相互作用,即满足朗缪尔模型条件。此时脱附激活能(E_d)不变,可以将脱附速率($d\sigma/dt$)与吸附量(σ)的关系写为式(2)^[10],式中 τ_0 是吸附态分子垂直于表面的振动周期,大约等于吸附剂表面原子或分子的振动周期,约为 10^{-13} s^[11], T 为温度。出气率可以写为 $q = -d\sigma/dt$,对式(2)进行积分变换得到表达式(3)^[10],即可以得到在封焊后杜瓦总出气率随时间变化的规律,可以反映出杜瓦的整个出气率水平,并可以推断出该类型杜瓦的真空寿命。

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{\sigma}{\tau_0} \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) \quad (2)$$

积分变换得:

$$\ln\left(-\frac{d\sigma}{dt}\right) = \ln\left(-\frac{d\sigma}{dt}\right)_0 - \frac{1}{\tau_0} \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right)t \quad (3)$$

1.2 脱附激活能计算方法

吸附在表面的不同粒子,具有不同的结合力,能量高于激活能的粒子可发生脱附。计算单种粒

子的激活能意义不大,因此可以计算平均激活能。根据温度函数(2),直接利用 $\ln q$ 与 $1/T$ 坐标图上曲线的斜率求 E_d 并外推其他温度下的出气率^[12]。虽然在覆盖度低时,可以认为此时脱附激活能不变,但覆盖度会影响到出气率,不同时刻的出气率不同,测试时出气率的选取时刻难以确定,导致这种方法获得的 E_d 的误差大。为了去除覆盖度的影响,采用测试过程中变温的方法,获得同一时刻也即相同覆盖度下不同温度的出气率。令变温前后的温度 T_1 和 T_2 对应的出气率分别为 q_1 和 q_2 ,同一时刻认为 σ 不变,根据公式(2),脱附激活能可以写为:

$$E_d = \frac{RT_1 T_2}{(T_1 - T_2)} \ln \frac{q_1}{q_2} \quad (4)$$

同样,在已知 E_d 及变温前的 T_1 对应的 q_1 时,可以求出 σ ,由于温度变为 T_2 后 σ 不变,即可获得变温后的初始出气率也即 q_2 (式(5)),并根据式(3)得到随时间变化的关系,可据此估算杜瓦内的真空度:

$$q_2 = q_1 \exp\left(\frac{E_d}{RT_1} - \frac{E_d}{RT_2}\right) \quad (5)$$

2 试验

2.1 实验样品

本试验使用样品为一光敏面为30 mm×30 mm的中型红外探测器杜瓦,工作温度为80 K。杜瓦整体呈柱状结构,杜瓦的剖面如图1所示,窗口帽直径64 mm,高50 mm,柱壳直径36 mm,高40 mm,芯柱直径14 mm,高度47 mm。计算得到杜瓦内部容积(V)为 $1.94E-4 \text{ m}^3$ 。为延长真空寿命,杜瓦中装有两个吸气剂。该吸气剂吸气量大,以 H_2 为例,两个吸气剂在室温能够吸收的总气体量可达为 $2.9 \text{ pa} \cdot \text{m}^3$ 。

为了对杜瓦寿命进行计算及验证,使用了两组

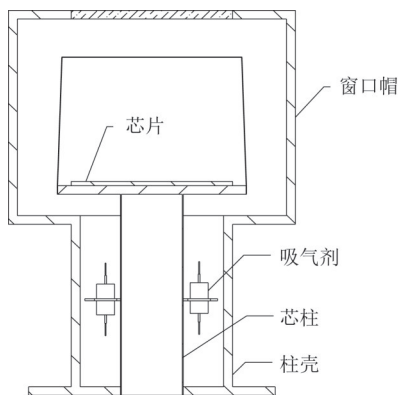


图1 试验用红外探测器杜瓦结构图

Fig. 1 The configuration diagram of Dewar sample

结构一致的杜瓦样品a1、a2、a3及b1、b2、b3、b4。其中a1-a3用来测定该杜瓦在排气结束时的脱附激活能,b1-b4进行寿命监测试验,计算获得真空度与热负载对应关系,以及不同排气时间下的真空寿命。

2.2 杜瓦排气系统

试验使用的杜瓦排气系统具有一个完整的排气机组,该系统原理框图如图2所示。测试之前先将杜瓦样品10连接到排气系统上,由于连接杜瓦使用的管道管径小,引入了一个流阻,用小孔元件9表示。排气时开启机械泵1、分子泵2和真空阀3、8,对真空腔室4和杜瓦样品10进行排气,在真空达到 $1E-4 \text{ Pa}$ 之后,关闭阀门3,由溅射离子泵持续排气。在开启阀门6时,可以观测腔体4内的真空度。同时,该系统也可以对杜瓦进行加热。

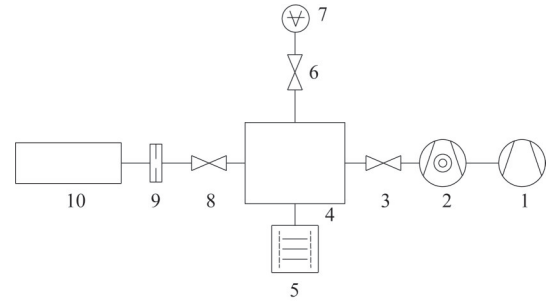


图2 杜瓦排气系统原理框图

Fig. 2 The configuration block diagram of degassing system

本文将根据排气过程中杜瓦的整体出气率,来估算杜瓦的真空寿命。排气台在真空度优于 $1E-4 \text{ Pa}$ 时使用离子泵进行排气,同一条管路中的排出气量是一致的,根据离子泵抽速(S_0)和真空计的读数 P ,可计算出离子泵的抽气量(Q)表示为:

$$Q = S_0 P \quad (6)$$

由于该杜瓦内部材料特性导致烘烤的最高温度为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$,而系统的腔体和管道都可以进行 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温烘烤,两者的出气率差别大,在此试验中暂不考虑系统管道及腔体的出气。因此 Q 包含了杜瓦中容积气体和杜瓦的材料出气。考虑一个无漏气无出气的理想容器,随着抽气时间增加,容器内气体压强降低,同一体积内的气体分子数减少,即使泵维持稳定抽速,被抽出的气体量也是越来越少的,容器内压强按指数规律下降,压强随时间变化规律可写为 $p_1 = p_0 e^{-S_0 t/V}$,其中 V/S_0 为真空系统的时间常数,时间常数越大,压强下降越慢。

该系统使用的离子泵额定抽速为 400 L/s ,根据泵的真空-抽速曲线,在 $1E-4 \text{ Pa}$ 至 $1E-7 \text{ Pa}$ 真空范

围内,平均抽速约为额定抽速的70%,即 $S_0=320\text{ L/s}$ 。但真空室与杜瓦之间需要靠可封焊管道连接,杜瓦的封焊管道内径为4 mm,长度为100 mm,离子泵抽气能力受到限制,根据气体稳定流动时流量守恒的定律可以得到杜瓦的实际抽速(S)与 S_0 和管道流导(U)之间的关系:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_0} + \frac{1}{U} \quad (7)$$

在杜瓦排气系统上离子泵工作压强 $1\text{E-}4\sim 1\text{E-}7\text{ Pa}$ 范围内,管道内流态为分子流,可以通过下式计算出管道孔口的流导:

$$U = \frac{\pi d^3}{3l} \sqrt{\frac{kT}{2\pi m_0}} \quad (8)$$

其中, d 为管道内径, l 为管长, m_0 取室温下空气的分子量进行近似计算,得到孔口流导为 $U=12.1*d^3/l=0.08\text{ l/s}$,根据式7可知,杜瓦的实际抽速也约为 0.08 l/s 。通过计算该杜瓦排气时 $V/S=2.4\text{ S}$,由于 V/S 数值非常小, p_1 下降速度也非常快,与数天的排气时间来比可以忽略不记,也即容积气体很快被抽出。因此,可认为排气过程中对真空度造成影响的只有杜瓦的材料出气(q)及泵的极限真空(p_m),离子泵排出的气体也可以写为:

$$Q = q + S_0 p_m \quad (9)$$

离子泵的离子流(I)和压强(P)具有 $I=KP^n$ 的关系,直接关闭阀门空抽,观察泵的离子流即可获得离子泵的极限真空,而排气过程中也对离子泵的离子流进行了监控记录,因此可以使用离子流代替真空度来进行杜瓦材料出气率的计算。

3 结果及分析

3.1 压强与离子泵阳极电流关系

由于离子泵的离子流和压强成正比 $I=KP^n$ 的关系,其中 n 在1~2之间。为了获得 K 和 n ,使用真空计监控真空,获得真空与离子流对应值,如图3所示,两者基本为线性关系,设定 n 为1,拟合计算离子泵离子流与真空度关系,得到 $K=9.1\text{E}6$ 。同时关闭图1中阀门3、6、8测得离子泵极限真空本底离子流为 $I_0=0.3\text{ }\mu\text{A}$ 。由于离子泵的 S_0 恒定,根据式(6)和(9),即可得到杜瓦出气率:

$$q = S_0(I - I_0)/K \quad (10)$$

3.2 激活能测试

采用排气过程中变温的方法可以获得出气激活能。为了获得排气后该杜瓦的激活能,使用三个样品a1、a2、a3,分别在不同排气时间及排气温度下

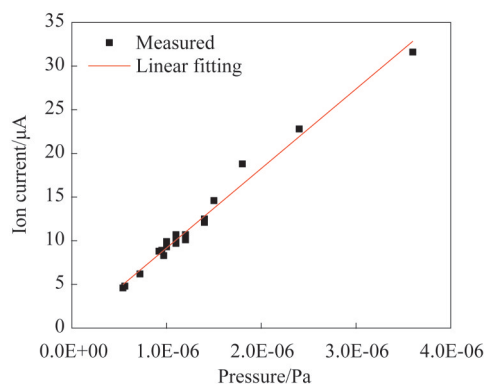


图3 真空度与离子泵离子流对应关系

Fig. 3 The pressure VS current of the ion pump

进行排气试验,分别获得激活能。再取三个杜瓦的激活能平均数作为该杜瓦排气结束时的激活能。其中a1、a2排气时长为12天左右,a1排气温度 $60\text{ }^\circ\text{C}$,末尾升为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 。A2排气温度 $70\text{ }^\circ\text{C}$,末尾升为 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 。a3排气时长约为21天,排气温度 $60\text{ }^\circ\text{C}$,末尾升为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 。在上述排气系统上对杜瓦样品进行排气,真空达到 $1\text{E-}4\text{ Pa}$ 之后,开启离子泵,过程中记录离子泵的离子流。待离子流稳定并达到试验要求的时间后,改变烘烤排气的温度,计算出此时杜瓦中气体的脱附激活能。

图4中黑色数据点为样品的离子流监控数据减去离子泵极限真空本底离子流,由于杜瓦升温并稳定温度需要一段时间,而激活能计算公式(4)要求的是同一时刻也即相同覆盖度下不同温度的出气率。因此,使用材料出气率随时间变化的经验公式(1)拟合得到的图中的红色曲线,并根据该曲线获得升温后数据记录同一时刻的出气率。

三个样品状态、升温前后离子流数据如下表1所示,根据公式(4)及出气率与离子流的关系计算出激活能,可以看出在杜瓦低温排气结束时,材料表面气体的平均激活能相近。求出三个杜瓦样品在排气后激活能平均数为 159 KJ/mol ,三个杜瓦在不同测试条件下获得的激活能的差异为8.8%。

3.3 真空寿命计算

使用样品b1、b2、b3、b4进行真空寿命监测实验,夹封前杜瓦样品在 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行排气,b1排气3天,b2排气6天,b3排气12天,b4排气22天。排气结束后,激活消气剂再夹封,在温度 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温柜中保存。虽然吸气剂在室温下几乎不吸收惰性气体,但仍将吸收掉杜瓦中近99%气体量^[13]。根据说明书,该吸气剂在常温下几乎不吸收碳氢化合物和惰性气体,使用质谱仪对该杜瓦的残气分析结果证

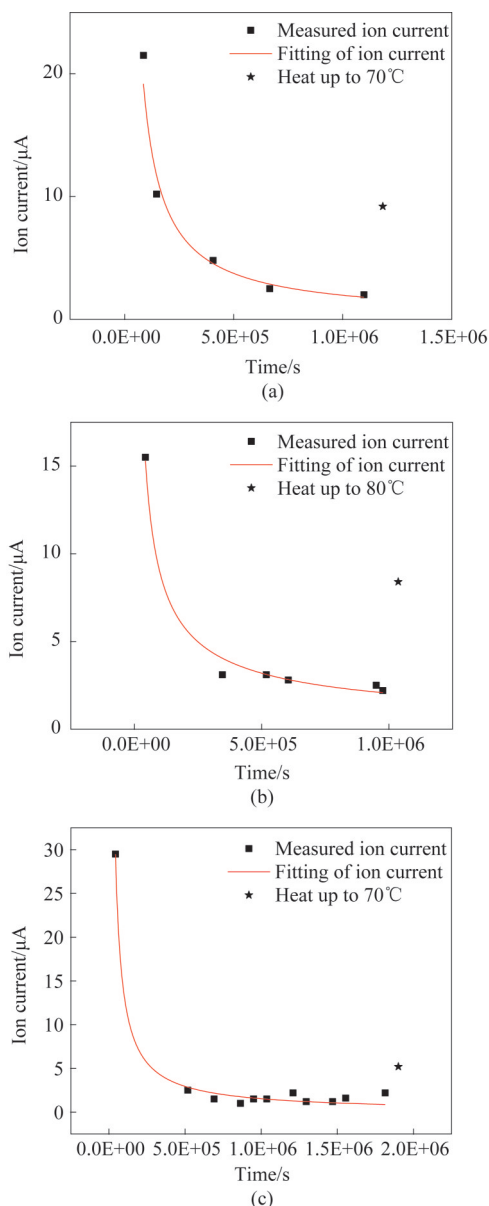


图4 (a) a1, (b) a2, (c) a3 杜瓦样品排气时的离子流监控数据及采用公式(1)拟合得到的曲线, 星形数据点为升温后的离子流

Fig. 4 (a) The ion current of the sample a1, (b) a2, (c) a3 in the degassing procedure and the fitting curve with formula (1), the star shape data is the ion current after temperature rise

明, 甲烷、乙烷、乙烯等碳氢化合物及稀有气体氦气

表1 a1-a3样品状态、升温前后离子流数据以及计算得到的脱附激活能

Table 1 The state of the sample a1-a3, the ion current before and after temperature rise, and the calculated out-gassing activation energy

样品	排气时间/day	排气温度/°C	升温后温度/°C	升温前离子流/μA	升温后离子流/μA	激活能 (KJ/mol)
a1	12	60	70	1.68	9.2	161
a2	12	70	80	1.99	8.4	145
a3	21	60	70	0.84	5.2	172

的分压约占总压强的2%, 即该吸气剂可吸收气体占比约为98%。根据3.2中获得的激活能, 以及排气结束时的离子流, 利用式(5)可以计算得到23 °C时的初始出气率。再由式(3)得到杜瓦在不同存储时间的出气率, 以吸气剂吸收杜瓦中98%的气体量进行计算, 可获得杜瓦内真空度。以b1为例, 排气结束时, 离子流8.7 μA, 去掉泵的极限离子流0.3 μA, 实际为8.4 μA, 根据3.2得到的激活能, 计算得到室温23 °C时, 初始出气率离子流为 $I_{23}=1.2E-3$ μA。对应的出气为 $q_{23}=SP=SI/K=4.2E-11$ Pa·m³/s。使用式(3)获得出气率随时间变化曲线后进行积分, 根据2.1杜瓦样品中的分析可知, 该杜瓦中吸气量远没达到饱和, 再考虑吸气剂的效率及杜瓦体积得到真空度随时间变化的关系。

在四个杜瓦存放一段时间之后进行杜瓦热负载测试。杜瓦刚夹封时测量得到平均热负载为656 mW, 测试误差PV值为41 mV, b1-b4由于真空度变化带来的热负载变化见表2最后一行。表2为样品b1-b4排气结束的状态、存储时间、计算得到的存储结束后真空度及热负载增量, 及实测热负载及增量汇总。

而杜瓦的真空度和气体热负载的对应关系可以通过杜瓦结构及工作环境进行计算。根据分子平均自由程与杜瓦内外夹层距离及冷屏和窗口帽距离大小之比, 将杜瓦内真空分为低真空、中真空、高真空三个不同状态, 分别计算气体的分子热传导^[14]。可以得到气体引入热负载随杜瓦内压强变化曲线如图5中实线所示, 初始高真空状态下热负载可以忽略不计, 热负载变化即为气体热负载。实测气体引入热负载如图5中散点所示。b1-b4通过平均激活能计算得到的真空变化带来的热负载增量去掉测试误差之后, 与实测值的误差约为总热负载的7.2%。可以看出实线和散点两者的符合性较好。如果以0.1 Pa作为杜瓦的真空寿命截止真空, 可以算出b1-b4的真空寿命见表3。

表 2 b1-b4 样品排气结束时离子流, 存储时间及存储后实测热负载及其变化, 以及计算得到的初始出气率、存放后真空度、热负载增量

Table 2 The ion current of the sample b1-b4 at the end of degassing procedure, The storage time and the heatload at the end of storage, the calculated outgassing rate at the beginning of storage, the pressure and the increased heatload at the end of storage

Sample	b1	b2	b3	b4
排气结束离子流/ μA	8.7	7.7	3.4	2.5
初始出气率/ $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$	4.2E-11	3.7E-11	1.6E-11	1.1E-11
存储时间/day	799	678	747	746
存储后压强/Pa	0.3	0.23	0.1	0.07
估算热负载增量/mW	356	289	142	102
实测热负载/mW	1100	872	847	702
实测热负载增量 t/mW	444	216	191	46

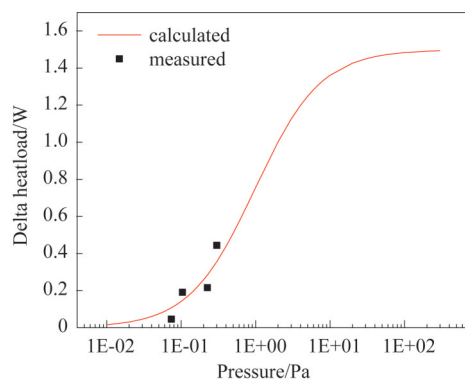


图 5 曲线为据杜瓦结构得到的气体引入热负载随压强变化关系, 散点为实测气体引入热负载

Fig. 5 The curve is delta heatload VS pressures in Dewar obtained by structure, the spots are tesdted delta heatloads

表 3 根据激活能、排气结束状态计算获得的 b1-b4 真空寿命

Table 3 The vacuum lifetime of b1-b4 calculated with the outgassing activation energy and the state of samples at the end of degassing procedure

样品	b1	b2	b3	b4
排气时间(day)	3	6	12	22
真空寿命(day)	266	302	721	1 016

3 结论

杜瓦整体出气率可反映所用材料和工艺水平及整体出气量的走势, 从而推算杜瓦的真空寿命。本文的研究聚焦在经过长时间排气的杜瓦整体平均出气激活能获得方法。提出了利用离子泵排气

系统和变温测试出气率, 计算出气激活能方法。实验发现通过不同排气时长及排气温度的样品计算出气激活能较为一致, 三个杜瓦样品的激活能差异为 8.8%。通过跟踪杜瓦存储条件真空变化, 理论计算与热负载实测结果相符, 误差在 7.2%。最终使用 0.1 Pa 作为截止真空计算出杜瓦样品在存储温度下的真空寿命。此法只需要在杜瓦排气结束时改变温度同时监测出气率, 就能根据排气温度和存储温度进行真空寿命估算, 不需增加设备和样本, 方便实施。控制好变温范围, 该方法不会损坏探测器性能, 为小批量、多样化杜瓦的真空寿命提供了便捷的无损检测估算方法。

References

- [1] A. Manissadjian, S. Magli, E. Mallet, *et al.* Compact dewar and electronics for large-format infrared detectors [C]// SPIE, 2011, **8012**: 801231
- [2] LIU Shao-Shuai, JIANG Zhen-Hua, ZHANG An-Kuo, *et al.* Study on high energy efficiency 30 K single-stage pulse tube cryocooler for a space infrared detector [J]. *J. Infrared Mil-lim. Waves* (刘少帅, 蒋珍华, 张安阔, 等. 空间红外探测用 30 K 单级脉管制冷机高效研究. *红外与毫米波学报*), 2018, **37**(4): 403-410.
- [3] Y. Luo, X. Wu, K. Wang, *et al.* Comparative study on surface influence to outgassing performance of aluminum alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2020, **502**, 114166: 1-8
- [4] Philippe Chorie. Sofradir MCT technology for space applications [C]// SPIE, 2009 7330, **733007**: 1-12
- [5] Yang Shaohua, Lai Canxiang. Accelerated Test and Life Prediction of Integrated Dewar for Infrared Detector Accelerated Test and Life Prediction of Integrated Dewar for Infrared Detector [C]// International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS), 2014, **978-1-4799-6632-5**: 230-232
- [6] Samiran Mukherjee, Paresh Panchal, Jyoti Shankar Mishra, *et al.* Hydrogen outgassing and permeation in stainless steel and its reduction for UHV applications [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, **44**: 968-974
- [7] Sami S. N., Sanati M., Joshi R. P. Simulations of hydrogen outgassing and sticking coefficients at a copper electrode surface: Dependencies on temperature, incident angle and energy [J]. *PHYSICAL REVIEW RESEARCH* **3**, 2021, **013203**: 1-11
- [8] Jae-Sung Kwon, Haeyong Jung, In Seok Yeo, *et al.* Outgassing characteristics of a polycarbonate core material for vacuum insulation panels [J]. *Vacuum*, 2011, **85**: 839-846
- [9] M Moraw, H Prasoi. An interpretation of outgassing characteristics of metals [J]. *Vacuum*, 1996, **47**: 1431 to 14361
- [10] Gao B H, Cui S Y. Vacuum physics [M]. Science Press (高本辉, 崔素言. *真空物理*) [M]. 科学出版社, 1983
- [11] Wang Y Z, Chen X. Vacuum Technology (2nd Edition) [M]. Beijing Aerospace Press (王欲知, 陈旭. *真空技术 (第二版)*) [M]. 北京航空航天大学出版社, 2006
- [12] Md Abdullah A. Mamun, Abdelmageed A. Elmustafa,

- Marcy L. Stutzman, et al. Effect of heat treatments and coatings on the outgassing rate of stainless steel chambers [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A* 32, 2014, **021604**
- [13] Stephen Whicker. New technologies for FPA dewars [C]// SPIE, 1992, **1683**:102-111.
- [14] Su H Y. Heat leakage analysis of miniature metal composite Dewar bottles [J]. *Aerial Weapon* (苏宏毅. 微型金属复合杜瓦瓶的漏热分析 [J]. *航空兵器*), 2002, **6**:28-30