

红外焦平面探测器杜瓦组件真空失效及其检测方法

李建林, 刘湘云, 朱颖峰, 孙娟

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 杜瓦真空失效造成光电转换探测系统的核心部件故障, 依据真空物理稀薄气体理论, 分析探讨了真空失效考核方法。检测组件在工作状态下的降温时间是否符合用户要求, 是确认真空失效最直接有效的方法。制冷机额定制冷功率与杜瓦最大无功功率之差, 即设计允许最大热负载增加量。在特定时间区间内, 利用液氮蒸发原理测量热负载增加量, 达到扩展不确定度 $30 \text{ mW} (k=3)$ 时, 可以认为杜瓦真空有用寿命不符合用户要求。用户定制 15 年真空有用寿命, 则要求杜瓦漏气速率小于 $5 \times 10^{-15} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 真空失效的气体压力大于 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 。

关键词: 红外焦平面; 杜瓦真空失效; 热负载; 降温时间; 可靠性

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-2874-06

IR FPA Dewar device vacuum failure and its test method

Li Jianlin, Liu Xiangyun, Zhu Yingfeng, Sun Juan

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Dewar vacuum failure is usually caused by IR FPA device malfunction, and the evaluation hereby used is testified as a valid method in discussing and analyzing such failure in accordance with Low Density Gas Theory of Vacuum Physics. The IR FPA Dewar device cooling time is regarded as the most direct and effective method in confirming such failure. Notice that the maximum heat loading variation between the maximum reactive power of IR FPA Dewar device and the rated capacity of the cooler should be in correspondence with its use-defined maximum cooling time. And Dewar vacuum life is considered unacceptable if the heat load variation being measured by LN Evaporation Principle is under such condition that the variation is within its specified time in the case it reaches expanded uncertainty ($k=3$). The value tested should be 30 mW . Within the customized vacuum service life of specified 15 years, the Dewar leakage and gas rate required must be less than $5 \times 10^{-15} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$. As the failure of Dewar vacuum occurred, and simultaneously, the gas pressure must be greater than $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$.

Key words: IR FPA; Dewar vacuum failure; heat load; cooling down time; reliability

0 引言

红外焦平面探测器杜瓦组件的质量特性与杜瓦真空腔体的气体压力有关,杜瓦真空度会随时间缓慢降低,引起光电性能和热性能的下降。杜瓦排气封离后,并不能容易地检测到真空腔体的气体压力,其真空度高难以直接测量。一般通过检测单位时间内经过杜瓦传导、对流和辐射传热导入内管积存液氮的总热流,利用相变在相同温度和压力下两相间的比焓差计算其热负载(总热流),间接判断确认杜瓦真空好坏。这样检测到的热负载不包括组件处于工作状态的焦耳热、目标和背景辐射热,通常称作静态热负载。工程实践中,人们认识到热负载测量观测值不准确不可靠,标准不确定度接近 $10 \text{ mW}^{[1-4]}$ 。

当组件经历时间达到真空有用寿命时,其杜瓦最低真空度(最大气体压力)、最大热负载和最大降温时间超出设计允许值。文中从真空物理稀薄气体理论出发,分析讨论热负载 Q_D 、热负载增加百分比 ΔQ_D 、残余气体传导热负载 Q_G 、残余气体压力 P 、平均漏气速率 Q 、真空有用寿命时间 t_k 和观察(储存)时间 t 、降温时间 t_{cd} 等之间相互依存的变化关系。依据高真空绝热效率,推导热负载加百分比 ΔQ_D 与真空有用寿命时间 t_k 和观察(储存)时间 t 的计算公式,实例显示文献报告中“热负载增加 15%~25%真空失效”^[5-8]的判据并不准确。指出检测降温时间是考核真空失效最直接有效的方法,由用户可接收降温时间范围,给出降温时间与热负载的近似计算公式。

1 真空失效的界定与表征

红外焦平面探测器杜瓦组件在所规定的工作和储存条件下,应保持其真空度高于设计允许值,当制冷机运行在正常工作状态、特性指标符合设计规范要求,因窗口结霜和气体传导热量损耗(热负载)增加到超出保证探测器最大工作温度要求,杜瓦真空腔体的气体压力超过了设计允许的最大气体压力,不能完成规定高真空绝热功能要求时,红外焦平面探测器杜瓦组件真空失效。

根据可靠性术语的定义,红外焦平面探测器杜瓦组件的真空寿命可区分为:有用寿命和使用寿命。无修理(电激活吸气剂),由制造工艺质量特性决定

的真空寿命为有用寿命,用排气封离后到第一次出现真空失效经历的时间度量。使用寿命是指有修理(电激活吸气剂),靠吸气剂延长寿命周期的真空寿命。它是真空可修复红外焦平面探测器杜瓦组件耐久性的特性指标,用达到吸气剂失效和真空失效所经历的时间度量。

度量真空失效的质量特性有:气体压力(真空度)或热负载、降温时间。文献中给出真空失效的最大允许气体压力有 $1 \text{ Pa}^{[6,9]}$ 、 $1 \times 10^{-1} \text{ Pa}^{[4,10]}$ 、 $1.333 \times 10^{-2} \text{ Pa}^{[11]}$ 。工程实用方法为直接测量 0.3 g 液氮汽化时间或液氮汽化的质量流量,间接测量(计算)热负载。当热负载测量值超出规定极限热负载时真空失效。一般认为,热负载增加百分比达到 15%^[12]、20%^[5-6]、25%^[7-8] 时真空失效。通常耦合了制冷机的红外焦平面探测器杜瓦组件,并不能容易地测量得到真空腔体的气体压力或热负载。制冷机特性指标符合设计规范要求,在规定测试条件下启动运行制冷机,检测探测器从环境温度达到规定工作温度的降温时间超过设计允许的最大降温时间,则红外焦平面探测器杜瓦组件真空失效。降温时间由用户所定制,一个典型应用在 $+23 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度的接收值小于 5 min 。

2 真空失效的气体源

可能造成红外焦平面探测器杜瓦组件真空失效的气体源有以下几种:(1) 大气经杜瓦真空腔体壁的泄漏,如密封接头;(2) 大气贮存在装配和结构材料内部的发纹、气孔和裂缝等的虚漏源;(3) 壳体相对边的气体压差引起渗透的气体源,如气体分子渗透金属、非金属材料晶格;(4) 真空腔体内的材料表面出气;(5) 结构材料的体出气;(6) 固体材料蒸发的气体,如汞、镉金属在室温下蒸气压大于 10^{-9} Pa ;(7) 金属材料表面的氧化物膜,在真空内氧化物的分解也是一种气体来源。

组件杜瓦真空腔体气体压力增大的原因,可能由上述任何一种或者其全部所造成。通过合理选择材料可以控制体出气(扩散)和渗透气体源;在装配前后进行有效的处理可以控制表面出气和蒸发;虚漏可以合理有效地结构设计来克服。一般地说,制造工艺缺陷带来的漏气远比壳体材料渗透大几个数量级;材料出气因材料经历不同而异,出气率要比漏气

率大 1~3 个数量级^[9]。由于存在上述造成真空失效的诸多原因,实际漏、出气的可能性是变化无常的,不可能从制造工艺过程中完全消除,因此必须通过测试来淘汰有漏、出气的红外焦平面探测器杜瓦组件。

3 热负载与热负载增加量

红外焦平面探测器杜瓦组件的热传导有传导、对流、辐射三种途径,通过优化设计导热截面积、选择导热率与发射率小的材料和利用高真空绝热等措施,可以控制组件杜瓦的热负载在设计允许的范围,热负载由下式计算:

$$Q_D = Q_R + Q_S + Q_G + Q_J + Q_{TB} \quad (1)$$

式中: Q_D 为红外焦平面探测器杜瓦组件的动态热负载, W; Q_R 为辐射传导造成的热量损耗, W; Q_S 为固体材料传导的热量损耗, W; Q_G 为组件杜瓦真空腔体残余气体传导造成的热量损耗, W; Q_J 为探测器工作时产生的焦耳热损耗, W, 不工作时 $Q_J=0$; Q_{TB} 为透过窗口汇聚到探测器上的目标和背景辐射热流, W, 不工作时 $Q_{TB}=0$ 。其中 Q_R 和 Q_S 与组件杜瓦真空腔体的气体压力无关,与杜瓦的结构、材料、工艺技术等工程因素有关,且与所处环境温度有关,一般 $Q_S/Q_R < 1$ 。而 Q_G 在低气体压力范围内是气体压力的函数,由下式给出^[13]:

$$Q_G = \frac{2\pi\alpha r_2 L k \Lambda (T_2 - T_1) P}{k + \alpha r_2 \Lambda P \ln \frac{r_1}{r_2}} \quad (2)$$

式中: α 为适应系数(调节系数); k 为气体的热传导系数, W/(cm·K); Λ 为自由分子热传导系数, W/(cm·K·Pa); T_1 、 T_2 为外壳和内管壁的温度, K; r_1 、 r_2 为外壳和内管的半径, cm; L 为内管的长度, cm; P 为制造工艺达到的最小残余气体压力, Pa, Q_G 即最小残余气体传导造成的热量损耗。

高真空绝热是将要求绝热的空间抽成 10^{-4} ~ 10^{-5} Pa 的真空度,排除气体的对流传热和绝大部分的气体热传导。残余气体的导热随着真空度的提高或气体压力的降低而减小。当杜瓦真空腔体里的气体压力小于 1×10^{-3} Pa 时,高真空绝热达到最大效率,相应的残余气体传导的热流不大于 0.25 W/m^2 ,其值小于辐射热流的 3%^[14]。由相似理论得 t 时刻残余气体传导热负载与气体压力的比例关系:

$$Q_G = 30P Q_R \quad (3)$$

在规定检测温度 23 °C(制造环境温度)下,热负载增加百分比定义为:

$$\Delta Q_D = \frac{Q_D - Q_D}{Q_D} = \frac{Q_G - Q_G}{Q_R + Q_S + Q_G} = \frac{\Delta Q_G Q_G}{Q_D} \quad (4)$$

(其中 $\Delta Q_G = \frac{Q_G - Q_G}{Q_G}$)

或者,热负载增加量为:

$$\Delta Q_D Q_D = \Delta Q_G Q_G \quad (5)$$

式中: ΔQ_D 为红外焦平面探测器杜瓦组件热负载增加百分比; ΔQ_G 为组件杜瓦真空腔体残余气体传导的热负载增加百分比; Q_D 、 Q_G 为 t 时刻红外焦平面探测器杜瓦组件的热负载和残余气体传导的热负载, W。

最大热负载增加百分比按下式计算:

$$\Delta Q_{D\max} = \frac{Q_C - Q_D}{Q_D} = n - 1 \quad (6)$$

(其中 $Q_C = n Q_D$ $n \geq 1$)

式中: Q_C 为制冷机的额定制冷功率, W; n 是安全系数(冗余系数),一般 $n=2$ 或 3。

4 设计允许的最大气体压力

理论分析和试验测量表明,红外焦平面探测器杜瓦组件真空腔体的气体压力对热负载的影响很大。当气体压力小于设计允许的最大气体压力时,残余气体传导的热量损耗仅占辐射和传导传热损耗的百分之几或更小,虽然气体压力在大范围内变化,但是热负载变化很小,此时的热负载称为红外焦平面探测器杜瓦组件的固有热负载 Q_{NG} 。当气体压力大于设计允许的最大压力时,残余气体传导热流量占辐射和传导传热的百分之十几或更大,此时热负载由缓慢增大到快速增大。设计允许的最大气体压力由红外整机分配给制冷机的最大功率而定,取决于红外焦平面探测器杜瓦组件的固有热负载和允许热负载增加量,受结构设计、选用材料和制造工艺水平等因素的限制。当红外焦平面探测器杜瓦组件的热负载达到或超过设计允许最大热负载时,组件杜瓦真空腔体的气体压力即为设计允许的最大气体压力。根据气体分子传热分析,可以证明设计允许的最大气体压力由下式给出:

$$P_{\max} = \frac{Q_G(1 + \Delta Q_G)}{a - b Q_G(1 + \Delta Q_G)} \quad (7)$$

式中: P_{\max} 为设计允许的最大气体压力, Pa; Q_G 为杜

瓦真空腔体残余气体传导造成的热量损耗, W ; a 、 b 为气体在杜瓦外壳和内管壁的适应系数、气体的热传导系数、自由分子热传导系数、外壳和内管壁的温度、外壳和内管的半径、外壳和内管的长度等结构设计、选用材料和制造工艺水平决定的常数,由公式(2)给出。

当红外焦平面探测器杜瓦组件置于偏离制造环境温度时,在分子平均自由程大于外壳与内管间距的杜瓦真空腔体中 $P/T^{-1/2}$ 是一个恒定值,这是因为 P 与 T 之间存在热分子压力效应, P 与 T 有如下比例关系^[14]:

$$P_T = \frac{\sqrt{T} P_{23\text{℃}}}{\sqrt{296.15}} \quad (8)$$

式中: T 为红外焦平面探测器杜瓦组件与环境热平衡的温度, K; 例如: $T=323.15, 343.15(+55\text{℃}, +70\text{℃})$; P_T 为对应环境温度 T 的气体压力, Pa; $P_{23\text{℃}}$ 是制造环境温度 296.15 K (23℃) 下的气体压力, Pa。

5 真空有用寿命与降温时间

由于存在造成红外焦平面探测器杜瓦组件真空失效的气体源,其真空腔体的气体压力随经历的环境温度和时间而变化,可以由下式描述平均漏气速率:

$$Q = RV = \frac{P_t - P_{\min}}{t} V \quad (9)$$

式中: Q 为最大漏气速率(各种气体源的总和), $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$; R 为最大升压率, Pa/s ; V 为真空腔体的容积, m^3 ; P_{\min} 为真空腔体的最小气体压力, Pa; 在充分排气的情况下 $P_{\min} < 1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$; P_t 为 t 时刻的气体压力或设计允许的最大气体压力, Pa; t 为排气封离后经历的时间, s。

因为,真空腔体在观察(储存)时间与有用寿命时间内的平均漏气速率相等,由公式(9)得:

$$t_{1s} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_t - P_{\min}} t \quad (10)$$

式中: P_{\max} 为设计允许最大气体压力, Pa; t_{1s} 为红外焦平面探测器杜瓦组件的真空有用寿命时间, s。

由公式(3)、(4)、(10)得:

$$\Delta Q_G = \frac{Q_G - Q_G}{Q_G} = 1000 \frac{(P_{\max} - P_{\min})t + P_{\min}t_{1s}}{t_{1s}} - 1 \quad (11)$$

在有用寿命周期内观察经历时间 t 后, t 时刻的热负载增加百分比由公式(3)、(5)、(11)得:

$$\Delta Q_D = \frac{\Delta Q_G Q_G}{Q_D} = \frac{3}{203} \left(1000 \frac{(P_{\max} - P_{\min})t + P_{\min}t_{1s}}{t_{1s}} - 1 \right) \quad (12)$$

式中:令 $Q_S = Q_R$ 。

由制冷机在规定温度下的额定制冷功率、红外焦平面探测器杜瓦组件固有热负载、能够达到的最小降温时间、设计允许的最大降温时间应用插值法得:

$$Q_{Dr} = \frac{Q_C(t_{cd} - t_{cd\min}) + Q_D(t_{cd\max} - t_{cd})}{t_{cd\max} - t_{cd\min}} = \frac{Q_C(n(t_{cd} - t_{cd\min}) + (t_{cd\max} - t_{cd}))}{n(t_{cd\max} - t_{cd\min})} \quad (13)$$

式中: t_{cd} 为降温时间, s; Q_{Dr} 为与降温时间 t_{cd} 相对应的热负载, W; $t_{cd\min}$ 、 $t_{cd\max}$ 为最小、最大降温时间, s。

6 应用举例

上述分析讨论热负载 Q_D 、热负载增加百分比 ΔQ_D 、残余气体传导热负载 Q_G 、残余气体压力 P 、平均漏出气速率 Q 、真空有用寿命时间 t_{1s} 和观察(储存)时间 t 、 t_{cd} 降温时间等之间的变化依存关系。

已知:制冷机在 77 K 的制冷功率 0.25、0.3、0.4、0.5 W,安全系数取 2、3,令 $Q_f=0$ 、 $Q_{fb}=0$ 、 $Q_R=Q_S$ 、 $Q_G=0.03Q_R$ 、 $P=1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$,红外焦平面探测器杜瓦组件真空腔体的容积 $3.24 \times 10^{-5} \text{ m}^3$,真空有用寿命时间 10、15、20 年。

按如下思路依据公式(1)~(12)计算处理数据得表 1 和表 2。由制冷机制冷功率、安全系数得到红外焦平面探测器杜瓦组件的热负载 Q_D 、最大热负载增加百分比 $\Delta Q_{D\max}$;考虑高真空绝热达到最大效率,并令辐射传导 Q_R 与固体材料传导 Q_S 相等,得到最小残余气体传导 $Q_{G\min}$,其对应最小压力 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。于是,按公式(3)、公式(4)得最大残余气体传导热负载 $Q_{G\max}$ 、热负载增加百分比 $\Delta Q_{G\max}$ 、残余气体压力 P_{\max} 。因为,组件一般置于 $+70\text{℃} \sim -55\text{℃}$ 或者 $+55\text{℃} \sim -45\text{℃}$ 的环境温度中使用,存在热分子压力效应。所以,把最大残余气体压力 P_{\max} 当作 $+70\text{℃} (+55\text{℃})$ 高温环境下的气体压力,利用公式(8)转换为制造环境温度 23℃ 下的压力 $P_{23\text{℃}}$ 。

由表 1 可知,不考虑结霜影响,仅由残余气体传导热流而耗散制冷机的制冷功率过大,使得探测器不能工作在最佳温度,其真空失效气体压力与制冷机制冷功率、安全系数、封装杜瓦固有热负载、制造工艺水平等因素有关,一般不大于 $1.26 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 或 $6.37 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 。

表 1 制冷机额定制冷功率与杜瓦固有热负载决定的允许最大气体压力

Tab.1 Rated capacity of cooler and Dewar maximum gas pressure by heat load

Q_c/W	Q_D/mW^1 Eq.(6)	Q_{Rmin}/mW^2 $Q_D/2.03$	Q_{Gmin}/mW $0.03Q_R$	ΔQ_{Gmax} Eq.(4)	P_{max}/Pa Eq.(3)	$P_{23^\circ C}/Pa$ Eq.(7)
0.50	250	123	4			
0.40	200	99	3	67.7%	6.87×10^{-2}	6.37×10^{-2}
0.30	150	74	2			
0.25	125	62	2			
0.50	167	82	2			
0.40	133	66	2	135%	1.36×10^{-1}	1.26×10^{-1}
0.30	100	49	1			
0.25	83	41	1			

按公式(9)计算得最大允许平均漏出气速率 Q 为 10^{-14} 、 10^{-15} Pa·m³/s 量级,利用公式(12)计算有用寿命周期内的热负载增加百分比,当热负载增加百分比达到 15%时,需要的天数见表 2 和图 1,其热负载增加量不大于 40 mW。

表 2 最大平均漏气速率决定的热负载增加量和观察时间

Tab.2 Heat load variation and observation time by Dewar maximum average leakage and gas rate

Q_c/W	n	$P_{23^\circ C}/Pa$ Eq.(7)	$Q/Pa \cdot m^3/s$ Eq.(9)	ΔQ_D	$\Delta Q_D/Q_D$ /mW Eq.(5)	t/Day Eq.(12)
0.50					38	
0.40	2	6.37×10^{-2}	$^{10}6.44 \times 10^{-15}$		30	$^{10}592$
0.30			$^{15}4.29 \times 10^{-15}$		23	$^{15}888$
0.25			$^{20}3.22 \times 10^{-15}$		19	$^{20}1182$
0.50				15%	25	
0.40	3	1.26×10^{-1}	$^{10}1.29 \times 10^{-14}$		20	$^{10}296$
0.30			$^{15}8.59 \times 10^{-15}$		15	$^{15}444$
0.25			$^{20}6.45 \times 10^{-15}$		13	$^{20}591$

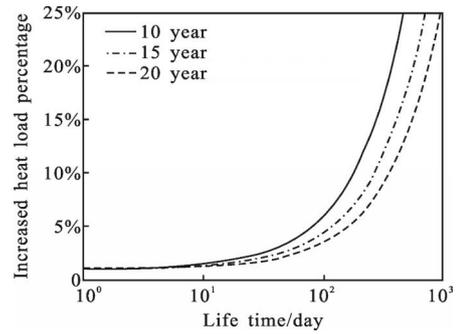


图 1 热负载增加百分比与有用寿命时间关系曲线

Fig.1 Relation between heat load variation percentage and useful life time

当用户可接收降温时间范围 260~600 s,红外焦平面探测器杜瓦组件适配额定制冷功率为 0.5、0.4、0.3 mW 的制冷机,安全系数 2 或 3,则杜瓦动态热负载与降温时间按公式(13)计算如图 2 所示。

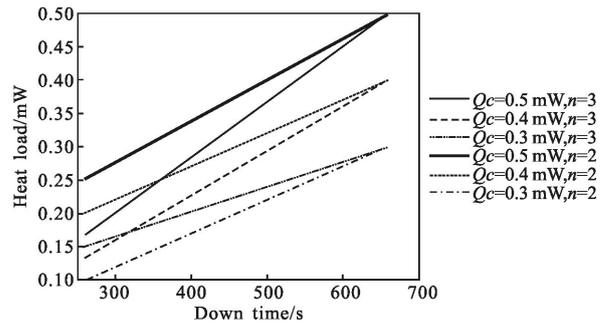


图 2 杜瓦动态热负载与降温时间关系曲线

Fig.2 Curves of Dewar dynamic heat load and the cooling time relation

7 结论

(1) 红外焦平面探测器杜瓦组件真空失效最直接有效地鉴别方法,就是在光电探测系统启动运行时,检测组件在工作状态下的降温时间是否符合用户要求。工作在环境温度+55℃(+70℃)时,杜瓦具有最大动态热负载,通常高温比常温时高出 60 mW。然而,制冷机故障也会引起降温时间不符合用户要求,必须注意区分。

(2) 高真空绝热效率最大时,气体传导热流最小,一般要求气体压力小于 1×10^{-3} Pa。气体传导热流随着真空度降低或气体压力升高大于 6.37×10^{-2} Pa 而增大,通常气体压力大于 1×10^{-2} Pa 可视为杜瓦真空失效。

(3) 静态热负载小于动态热负载几十毫瓦或上百毫瓦,用静态热负载增加百分比判断杜瓦真空失效,忽略了作用于冷指上探测器处于工作状态产生的焦耳热、透过窗口汇聚到探测器上的目标和背景辐射热流,以及高温+55℃(+70℃)环境温度的影响,即使静态热负载增加百分比达到 50%,通常也没有真空失效。

(4) 用户定制有用真空寿命 15 年,要求杜瓦真空腔体的平均漏气速率 Q 小于 $5 \times 10^{-15} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。因而,在较短观察时间(制造周期)内,不能利用液氮蒸发原理测量热负载增加量,而可靠地推论预测长达 15 年的有用真空寿命。在特定时间区间内,热负载增加量达到测量扩展不确定度决定的误差极限约 30 mW 时,可以认为杜瓦真空有用寿命不符合用户定制要求。

(5) 真空失效的考核指标依用户要求而异,红外焦平面探测器杜瓦组件配置不同,失效判据也不一样,并没有一个统一的真空失效衡量标准。针对特定配置组件,必须理论分析或试验确定具体可检测的失效指标值。

参考文献:

- [1] Li Jianlin. The effect of frosting on the measurement of thermal load of mini metal dewar [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(12): 724–729. (in Chinese)
李建林. 结霜(露)对微型金属杜瓦瓶热负载测量质量的影响[J]. 红外技术, 2007, 29(12): 724–729.
- [2] Li Jianlin, Zhou Xiaojun. Heat load measurement of the micro metal dewar with mass flow method and its calculation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 141–148. (in Chinese)
李建林, 周孝军. 利用流量法测量微型金属杜瓦瓶热负载及其计算方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 141–148.
- [3] Zhang Yani, Zhu Sangan, Gong Haimei. Research on vacuum life of micro metal Dewar [J]. *Infrared*, 2008, 29(3): 13. (in Chinese)
张亚妮, 朱三根, 龚海梅. 微型杜瓦组件加速寿命试验的研究[J]. 红外, 2008, 29(3): 13.
- [4] Zhu Kuizhang, Le Ziling, Sun Penghong, et al. Studies of the vacuum life of the infrared micro metal Dewar [J]. *Cryogenics and Super Conductivity*, 1989, 26(4): 11–15. (in Chinese)
朱魁章, 乐子玲, 孙鹏红, 等. 红外微型金属杜瓦的真空寿命研究[J]. 低温与超导, 1989, 26(4): 11–15.
- [5] Lin Ridong, Liu Wei, Wang Guan, et al. Vacuum life analyse of infrared detector & dewar assembly [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(7): 779–783. (in Chinese)
林日东, 刘伟, 王冠, 等. 红外焦平面探测器杜瓦组件真空寿命分析[J]. 激光与红外, 2011, 41(7): 779–783.
- [6] Cui Junsheng, Jia Weimin. An analysis about the factors affecting working life of infrared detector [J]. *Aero Weaponry*, 2011(5): 39–42. (in Chinese)
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.
- [7] Brenière X, Tribolet P. IR detectors design and approach for tactical applications with high reliability without maintenance [C]//SPIE, 2008, 6940: 0H.
- [8] Marianne Molina, Xavier Breniere, Philippe Tribolet. IR detector dewar and assemblies for stringent environmental conditions[C]//SPIE, 2007, 6542: 85.
- [9] Long Jiexun. Effects of the vacuum on performance of D64JT7 Dewar of IR detectors [J]. *Infrared Technology*, 1995, 17(2): 9–13. (in Chinese)
龙杰勋. 真空度对红外探测器/D64JT7 型系列杜瓦瓶性能的影响[J]. 红外技术, 1995, 17(2): 9–13.
- [10] Liu Bogao, Wei Donghong. Vacuum leakage in the mini-detector/Dewar without gas-absorber [J]. *Infrared Technology*, 1995, 17(5): 19–22. (in Chinese)
刘伯高, 魏东红. 浅谈无消气剂小型探测器的实漏 [J]. 红外技术, 1995, 17(5): 19–22.
- [11] 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的分析 [J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 275–278.
- [12] DT-594/UA. MIL-D-49172(ER), Dewar-Detector Device [S]. 1982: 10.
- [13] Chen Pijin. The Scientific Basis of Vacuum Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1987: 139. (in Chinese)
陈丕瑾. 真空技术的科学基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1987: 139.
- [14] Chen Guobang, Zhang Peng. Low Temperature Unique Hot With Transmit Heat the Technique [M]. Beijing: Science Press, 2004, 64: 9. (in Chinese)
陈国邦, 张鹏. 低温绝热与传热技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004, 64: 9.