

超长线列红外探测器杜瓦真空寿命评估方法

李俊^{1,2,3}, 王小坤^{1,2}, 张磊^{1,2}, 孙闻^{1,2}, 曾智江^{1,2,3}, 龚海梅^{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 100049)

摘要:针对超长线列红外探测器杜瓦具有容积大、零部件种类多、材料放气源多,特别是集成式超长线列杜瓦与内充3 MPa高压氦气的直线脉管冷指封装集成等特点,基于材料解析放气及渗透理论,建立了超长线列杜瓦组件真空寿命评估模型,对分置式与集成式超长线列杜瓦的真空寿命进行了计算,其真空寿命预计值均可以达到2年。设计了一种杜瓦真空度在线监测结构对这两类杜瓦的真空度进行了实时监测,分置式及集成式杜瓦真空寿命预计值与实测值相对误差分别为5.8%和6.96%。因集成式杜瓦真空寿命估算较为困难,对其热负载通过制冷性能进行实验验证,其热负载2年后未发生明显变化。

关键词:超长线列红外探测器;分置式与集成式超长线列杜瓦;真空寿命评估

中图分类号:TN215;TB65 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.07.010

Evaluation method of vacuum life for long linear IRFPA Dewar assembly

LI Jun^{1,2,3}, WANG Xiao-kun^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}, SUN Wen^{1,2}, ZENG Zhi-jiang^{1,2,3}, GONG Hai-mei^{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 100049, China)

Abstract: According to the characteristics of the Dewar for long linear HgCdTe IRFPA detector with the large volume, many kinds of parts and the deflated sources of the different materials, especially integrated with the inline pulse tube filled with the 3MPa high-pressure helium, based on the material analysis of gas diffusion and infiltration theory, the vacuum life estimation model for the long linear FPA Dewar assembly was established. The vacuum lives of the split-type and integrated long linear FPA Dewar were calculated and predicted values of the vacuum lives are both more than 2 years. The online monitoring structure for Dewar vacuum degree was designed to monitor the vacuum of these two types of Dewar for a long period of time. The predicted results were compared with the measured value, the relative error of split Dewar is 5.8% and the other is 6.96%. Because the integrated Dewar vacuum is difficult to estimate, so it's thermal performance is verified by the tests of the cooling performance, and there is no obvious change in the thermal load of the integrated Dewar.

Key words: long linear IRFPA; split-type and integrated Dewar; evaluation method of vacuum life

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61475179);中国科学院青年创新促进会基金项目(No. 2014215)资助。

作者简介:李俊(1984-),男,助理研究员,博士研究生,主要从事红外探测器封装与集成技术研究。

E-mail: cfdlijun@126.com

通讯作者:龚海梅(1965-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事航天遥感用红外光电探测器的应用基础研究。

E-mail: hmgong@mail.sitp

收稿日期:2018-01-11

1 引言

随着空间遥感分辨率及灵敏度的提高,航天红外焦平面探测器的规模朝向超长线列发展,线列拼接的规模已经从 2000 元、5000 元到 15000 元^[1-3],长线列拼接器件的总焦耳热及超长线列杜瓦的热负载也随之增加。为了满足制冷量的需求,装载焦平面探测器的超长线列杜瓦冷平台多与斯特林制冷机或直线型脉冲管制冷机冷指进行耦合^[4]。超长线列杜瓦组件在地面测试过程中需要保证探测器能够正常工作、杜瓦热负载及制冷机制冷性能不受影响(如制冷机的降温时间延长、制冷功耗增加等)及红外光窗不结霜^[5],这些都要求超长线列杜瓦制冷组件要有较长的真空寿命。

近年来,国内外对微型金属杜瓦的真空寿命评估及加速寿命的理论开展了深入研究^[5-8]。目前国外 288 × 4 元焦平面微型金属杜瓦通过 80 °C 存储 405 天后对应 40 °C 真空寿命为 18 年^[6],国内某机载 576 × 6 HgCdTe 红外焦平面微型杜瓦通过加速寿命分析可达到 10 年使用无维护的要求^[7]。

目前对于超长线列大容积杜瓦($2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 以上),特别是集成了直线脉管冷指的大容积杜瓦的真空寿命评估较少见于报道。本文分析了影响超长线列杜瓦真空寿命的关键因素,基于材料解析放气及渗透理论,建立了超长线列红外探测器杜瓦真空寿命评估模型,分别选取典型分置式和集成式杜瓦进行真空寿命研究,并对其真空度进行了长期监测,真空寿命评估方法得到了有效验证。

2 超长线列杜瓦真空寿命评估方法

2.1 超长线列杜瓦结构

超长线列杜瓦与制冷机耦合方式包括分置式或集成式^[4]。图 1(a)为超长线列分置式杜瓦结构,与微型金属杜瓦结构相似,通常由光学窗口、窗口帽、底板、柱壳及芯柱等零部件气密焊接形成高真空腔体(一般优于 10^{-4} Pa),真空腔内部为长线列红外探测器、基板、滤光片支架、冷屏及冷链等。根据焦平面线列拼接长度及整机光学接口要求,超长线列杜瓦冷平台尺寸约为 200 ~ 300 mm,容积 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 以上,杜瓦内大部分零件表面积比较大,但是其结构因与微型金属杜瓦结构类似,在真空寿命计算时可以参考微型杜瓦真空寿命计算方法对杜瓦的焊接漏

率、内部材料放气、排气烘烤时间及消气剂的吸附总量等因素进行考虑。图 1(b)为集成直线脉管式超长线列杜瓦结构,其真空腔上部与分置式超长线列杜瓦相似,下部腔体与充有 3 MPa 的高纯氮气的直线脉管通过激光气密焊接实现高真空腔体。集成直线脉管式超长线列杜瓦在进行真空寿命评估时除了考虑上述因素外,还要考虑在杜瓦真空腔体与直线脉管冷指之间 3 MPa 的高压差作用,高纯氮气可能通过管状零件的薄壁及焊缝微漏孔向杜瓦真空腔内进行渗透放气,因此需要计算杜瓦高真空到内部真空压力优于 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 时的氮气渗透对真空的影响。

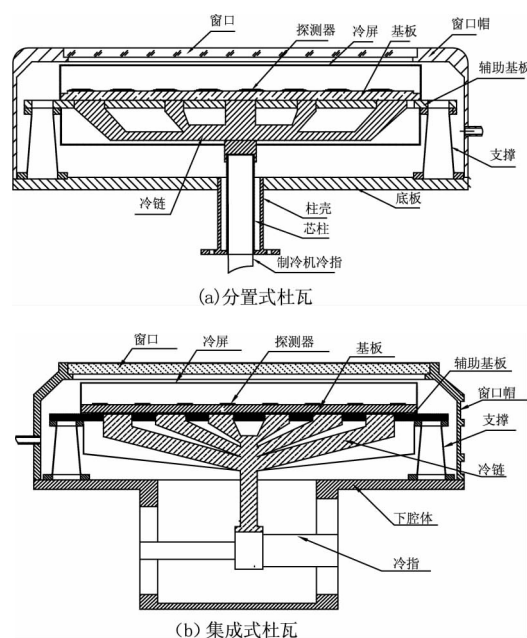


图1 超长线列红外探测器杜瓦结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Dewar for long linear FPA

2.2 超长线列真空寿命计算模型

金属杜瓦从超高真空排气台上夹封后的那一时刻 t_0 算起到任一时刻 t 时,杜瓦真空满足式(1)的动态平衡方程^[5]:

$$P_t - P_{t_0} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \int (Q_i dt) + P_{He} \quad (1)$$

$$P_t = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \int (Q_i dt) + P_{t_0} + P_{He} \quad (2)$$

式中, P_t 为封离后 t 时刻杜瓦内部的真空度; P_{t_0} 为封离时杜瓦内达到的最高真空度; P_{He} 为腔体内部氮气渗透所产生的分压,分置式杜瓦计算时可以忽略; V 为杜瓦真空腔的容积,分置式杜瓦容积为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,集成式杜瓦容积为 $4.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$;

Q_i 为真空暴露面积下各种材料放气的总出气量。

影响杜瓦真空寿命主要因素包括蒸发、扩散、渗透、解吸以及焊缝微漏,当焊缝漏率达到 $1.33 \times 10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 时,影响杜瓦真空寿命的主要因素为材料解吸及渗透^[5]。本文重点分析两者对真空的影响。

2.2.1 材料解析放气

材料的解析放气速率是时间和温度的反比例函数,但是在夹封前需对杜瓦进行 50°C 烘烤除气,温度的影响可忽略。当只考虑时间作用下材料的解析放气速率可以由公式(3)~(4)解得^[9]:

$$\lg q_t = \lg q_1 - \alpha \lg t \quad (3)$$

$$q_t = \frac{q_0}{t^\alpha} \quad (4)$$

其中, q_t 为单位面积材料暴露在真空中 t 小时后的解吸速率,单位 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$; q_1 , q_0 为常数; t 为从开始抽真空算起的时间,本文在计算时均将小时转换为天数; α 为解吸速率的衰减系数。利用专用设备对封装常用材料 80°C 烘烤时的放气速率进行了测试,测试数据如图2所示,其余部分零件计算时采用常温时材料放气速率的参数^[9]。从图2可以发现陶瓷和可伐解析速率较快,当杜瓦腔体表面与容积之比较大以及杜瓦的主要零件材质为可伐时,其解析放气总量将会对真空的影响更加明显^[10]。

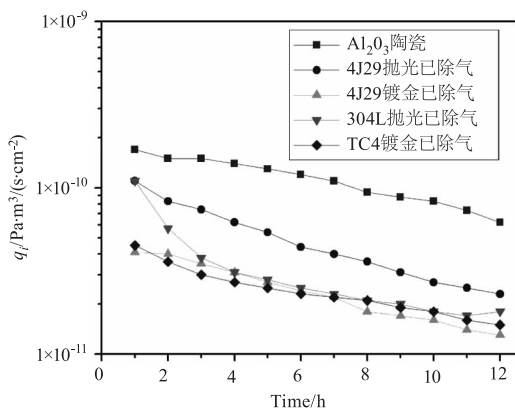


图2 超长线列杜瓦主要材料放气速率测试曲线示意图

Fig. 2 The outgassing rate for the main material in Dewar

根据图2中杜瓦材料不同时间的解吸速率及表1中零件真空暴露面积,由式(5)可以算出各种材料解析气源的出气量 Q_i ^[9]:

$$Q_i = A \cdot \int_{t_0}^t q_i dt \quad (5)$$

具体结果如表1所示。

表1 超长线列杜瓦零部件参数

Tab. 1 The parameters of the Dewar parts

材料名称	耦合状态	零部件名称	真空面积/ cm^2
可伐	分置式	外壳、底板、基板、滤光片支架、冷屏等	2474
	集成式	外壳、下真空腔壳、基板、滤光片支架、冷屏等	3300
TC4	分置式	辅助基板、支撑	537.6
	集成式	辅助基板、支撑	579
不锈钢 304L	分置式	芯柱、柱壳	78
	集成式	直线脉管冷指	142
无氧铜	分置式	排气管、冷链等	237
	集成式	排气管、冷链等	1507
Al_2O_3 陶瓷	分置式	引线基板、窗口	308
	集成式	引线基板、窗口	375
环氧塑脂	分置式	DW3, 模块及螺钉点胶	26
	集成式	DW3, 模块及螺钉点胶	34.68

2.2.2 渗透放气^[9]

金属杜瓦主要考虑氦的原子态渗透,超长线列杜瓦外部零件壁厚一般都大于 2 mm ,因此氦气对其外部零部件及蓝宝石窗口的渗透因计算数值太小忽略不计^[8]。本文主要对集成式杜瓦的直线脉管冷指不锈钢薄壁零件与杜瓦真空腔两侧存在压差时氦气渗透的计算。对于不产生离解的分子态渗透,渗透速率满足:

$$q_p = \frac{K_{\text{He}} A_{\text{tube}} \Delta p_{\text{tube}}}{d_{\text{tube}}} \quad (6)$$

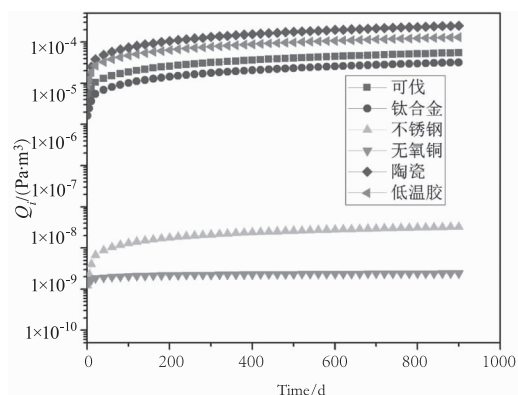
式中, q_p 为渗透速率; K_{He} 为 300 K 时氦对不锈钢的渗透系数为 $7.5 \times 10^{-22} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}^{1/2} \cdot \text{mm}^{-1})$,直线脉管全部零件真空暴露面积 A_{tube} 为 142 cm^2 ,焊缝全部漏率为 $6 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,则由式(6)可以计算脉管的渗透速率 q_p 为 $7.07 \times 10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。由渗透速率 q_p 可以进行计算氦气微渗漏对腔体真空度的影响。

$$P_{\text{He}} = \frac{q_p \cdot t}{V} \quad (7)$$

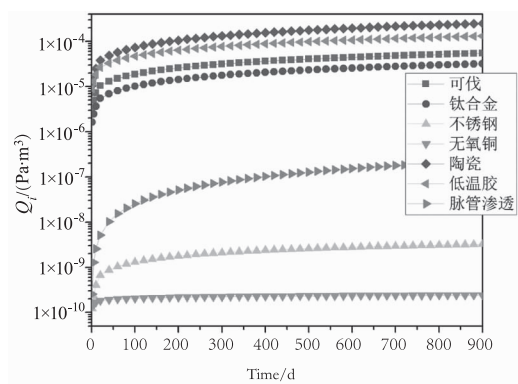
式中, P_{He} 为腔体内部氦气渗透所产生的分压; t 为放气时间; V 为杜瓦腔体的总容积。

通过式(1)~(6)可以获得分置式及集成式杜瓦的材料的放气总量 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3$),如图3所示,两种杜瓦内部的放气主要来源比例依次是陶瓷、低温胶、

可伐及钛合金材料的解析放气造成的。因此对于这些金属零部件需要进一步优化真空烘烤除气的温度及时间,同时控制低温胶用量,以减小各材料的放气量对杜瓦真空的影响。



(a) 分置式



(b) 集成式

图3 超长线列杜瓦材料放气总量

Fig. 3 Total outgassing of the Dewar for long linear FPA

2.3 计算条件

在对上述两类杜瓦的真空寿命进行估算时,主要考虑:(1)杜瓦金属零件表面均进行抛光、镀金处理以减少零件表面的出气率;(2)金属零件进行250℃及24h烘烤除气处理;(3)非金属零件如窗口、宝石片、电路板等进行80℃及24h烘烤除气处理;(4)杜瓦整体漏率优于 $1.33 \times 10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (文献[5]报道杜瓦漏率优于 $1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 时其真空寿命大于3年);(5)两类杜瓦均进行超高真空长时间烘烤排气;(6)杜瓦夹封离开排气台后不考虑蒸发及漏率对其真空寿命的影响。

2.4 计算结果及分析

根据上述计算条件对分置式及集成式超长线列杜瓦的真空寿命进行计算,计算结果分别如图4所示。

分置式超长线列杜瓦在2年时真空度为 $2.93 \times 10^{-3} \text{ Pa}$,集成脉管式杜瓦在2年时真空度为 6.42

$\times 10^{-3} \text{ Pa}$,两类杜瓦的真空度均优于 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$,此真空状态下满足制冷机开机及探测器正常工作。分置式杜瓦内部放气因素主要是多层陶瓷电极板及低温胶等非金属材料解析放气;其次可伐、钛合金等金属零件表面虽然经过抛光镀金处理,但是因表面积较大,对其真空寿命产生显著影响。集成式超长线列杜瓦虽然有少量氦气的渗透,放气总量虽然在 $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3$ 数量级,但仅占放气源的较小的比例。

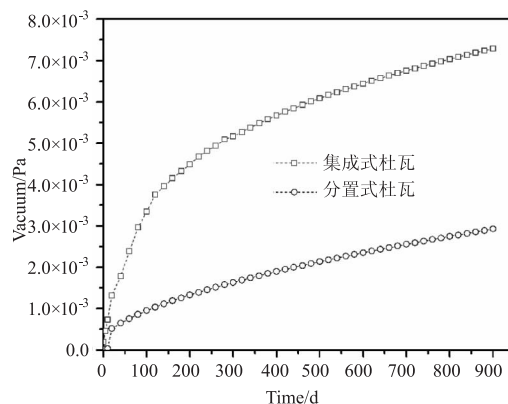


图4 超长线列杜瓦真空寿命计算曲线

Fig. 4 Schematic diagram of the Dewar for long linear FPA

3 超长线列杜瓦真空性能试验验证

3.1 在线真空度监测结构设计

杜瓦从排气台夹封之后的真空度一般都难以在线监测,通常采用杜瓦热负载测试以及制冷机开机前后的功耗及降温时间分析杜瓦真空是否失效^[9]。本文设计了一种杜瓦真空度在线监测结构,可以对两类超长线列杜瓦真空度长期监测。结构如图5所示,主要由杜瓦排气管、绝缘陶瓷排气管(防电流导电至外壳上)、真空规、复合真空计等组成。真空规安装于杜瓦之前要进行烘烤除气,避免放气的影响。真空规通过三通接头安装在杜瓦排气管末端,另一端与排气台相连。真空规从排气台夹封时作为杜瓦的一部分,夹封之后可以对其真空度进行实时监测。

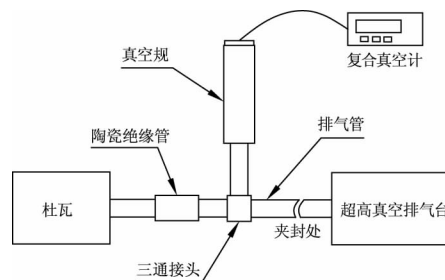


图5 真空度在线检测结构示意图

Fig. 5 The online monitoring structure of the long linear Dewar vacuum degree

3.2 杜瓦夹封后的真空度监测

选取超长线列分置式杜瓦及集成式杜瓦作为监测对象,分别将其从排气台夹封后通过电真空规对真空度进行2年的监测,图6为分置式杜瓦及集成式杜瓦真空度监测曲线。

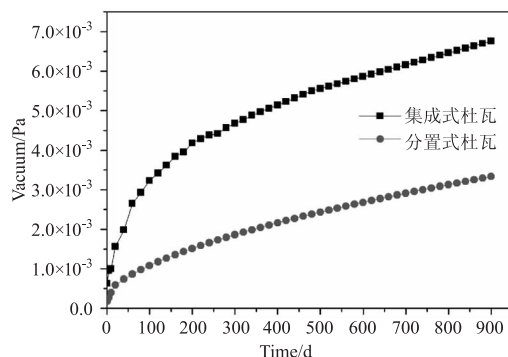


图6 超长线列杜瓦真空度监测曲线

Fig. 6 The tested data of the Dewar vacuum life

根据容积较大的杜瓦内分子平均自由程和气体传热空间尺寸确定气体的传热状态,确定接近 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 为终止压强^[11]。在线监测结果表明分置式及集成超长线列杜瓦2年后的真空度分别为 $3.12 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 及 $6.9 \times 10^{-3} \text{ Pa}$,均低于 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ (此真空状态时对流传热对杜瓦热负载具有较大影响)的要求。因此对于其热负载及制冷降温时间的影响将不会成为主要因素。

3.3 脉管氮渗透对杜瓦组件真空寿命的影响

考虑集成式杜瓦结构复杂性,对其真空评估比较困难,因此可对集成式杜瓦制冷组件进行制冷机开机验证杜瓦热负载状态。数据见表2,制冷机的功耗变化为1.8%。

表2 集成式杜瓦组件制冷性能测试

Tab. 2 The cold performance test results of the integrated Dewar

编号	真空度 /Pa	冷平台温度 /K	制冷机功耗 /W	
			夹封时	2年后
201502	6.9×10^{-3}	95	50	50.9

由于吸气剂对氮的吸附能力很小,两年的真空度变化较小,而且真空优于 $6.9 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。通过激活吸气剂后发现制冷功耗下降至50 W。而且监测杜瓦冷平台的回温曲线,基本与两年前的回温曲线一致,如图7所示。以上两点证明选用0.15 mm以上的薄壁管,脉管内部氮气渗透产生的分压对整个

杜瓦的压强的影响可以忽略。

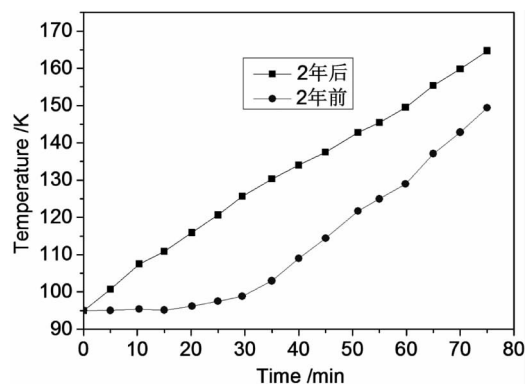


图7 集成式杜瓦冷平台升温曲线

Fig. 8 The curves of temperature rising of the integrated Dewar cold plate

4 结论

本文建立了超长线列杜瓦材料放气速率及渗透速率模型,对分置式及集成直线脉管杜瓦的真空寿命进行了理论计算,测试与理论值相对误差分别为5.8%和6.96%,并设计实验验证了脉管氮渗透对真空的影响。通过超长线列红外探测器杜瓦真空寿命评估可以对设计和研制工艺有一定的指导价值,有利于推进超长线列红外杜瓦组件的工程化应用。

参考文献:

- [1] WANG Chenggang, DONG Haijie. Butted manner analysis of long linear infrared focal plane detectors of MCT[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(8): 920-923. (in Chinese)
王成刚, 东海杰. 超长线列碲镉汞红外探测器拼接方式对比分析[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 920-923.
- [2] XIE Heng, DONG Haijie, ZHANG Yi. Research on butting technology of long-wave infrared linear HgCdTe FPA[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(1): 58-61. (in Chinese)
谢珩, 东海杰, 张懿. 长波长线列碲镉汞焦平面器件拼接工艺研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(1): 58-61.
- [3] CHEN Boliang, LI Xiangyang. Infrared imaging detectors for space applications[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
陈伯良, 李向阳. 航天红外成像探测器[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [4] FAN Guangyu, FAN Cui, LI Jun, et al. Cold strap design of long linear IRFPA dewar[J]. Infrared and Laser Engi-

- neering, 2015, 44(7): 2021–2026. (in Chinese)
- 范广宇, 范崔, 李俊, 等. 超长线列红外焦平面杜瓦冷链设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2021–2026.
- [5] ZHU Kuizhang, LE Ziling, SUN Penghong, et al. Studies of the Vacuum Life of the Infrared Micro Metal Dewar [J]. Cryogenics and Superconductive, 1998, 26(4): 11–15. (in Chinese)
- 朱魁章, 乐子玲, 孙朋红, 等. 红外微型金属杜瓦的真空寿命研究[J]. 低温与超导, 1998, 26(4): 11–15.
- [6] Brenière X, Tribolet P. IR detectors design and approach for tactical applications with high reliability without maintenance[C]//Proc. of SPIE, 2008, 6940: 69400H–1–69400H–13.
- [7] LIN Ridong, LIU Wei, WANG Guan, et al. Vacuum life analyses 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.
- [8] ZHANG Yaping, ZHU Yingfeng, LIU Xiangyun, et al. Influence of diffusion Out-Gassing on Life-Time of dewar vessels[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(1): 28–31. (in Chinese)
- 张亚平, 朱颖峰, 刘湘云, 等. 基于扩散放气模型的杜瓦真空寿命分析[J]. 激光与红外, 2014, 44(1): 28–31.
- [9] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [10] ZHANG Shiwei, ZHANG Zhijun, XU Chenghai, et al. Outgassing Rate of Kovar Alloy and holding Vacuum Degree in Minisized Container[J]. Journal of Northeastern University, 2004, 34(4): 275–279. (in Chinese)
- 张世伟, 张志军, 徐成海, 等. 可伐合金材料放气与微小容器的真空保持[J]. 东北大学学报, 2004, 34(4): 275–279.
- [11] YU Xiaobing. Analysis of Dewar Thermal Isolation and High Vacuum Lifetime[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4): 275–279. (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): 275–279.