

# 大规模红外探测器杜瓦热负载实验测量研究

徐圣亚, 戴立群, 孙启扬, 张旭, 徐丽娜, 赵艳华

(北京空间机电研究所 探测器技术实验室, 北京 100094)

**摘要:** 随着航天遥感应用对大视场、高分辨率探测的需求, 红外探测器规模越来越大。红外探测器需封装在杜瓦内工作, 杜瓦热负载是杜瓦一个重要指标。本文设计并搭建了大规模探测器杜瓦热负载测试实验装置, 测得长波杜瓦组件不同外壳温度下的热负载, 为实际工程应用提供了重要数据。

**关键词:** 大规模红外探测器; 长波杜瓦组件; 热负载; 实验测量

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2018)08-0739-04

## Experimental Measurement and Study of the Thermal Load of a Large-Format Infrared Detector Dewar

XU Shengya, DAI Liqun, SUN Qiyang, ZHANG Xu, XU Lina, ZHAO Yanhua

(The Detector Technology Lab of Beijing Institute of Space Mechanics & Electrics, Beijing 100094, China)

**Abstract:** As aerospace remote applications demand a wider field of view with higher resolution, the format of infrared detectors is increasing. An infrared detector must be packaged in a dewar to work, and the thermal load is an important parameter of the dewar. A thermal load testing device was designed and developed, and the thermal load of a long-wavelength infrared dewar at different shell temperatures was measured, which provides important data for practical engineering applications.

**Key words:** large format infrared detector, long-wave detector dewar assembly, thermal load, experiment measure

### 0 引言

随着航天红外遥感相机的发展, 红外探测器逐步从单元器件和小规模线列发展为超长线列和超大规模面阵红外探测器。航天各类应用平台对红外探测器阵列规模(2000元、5000元、8000元等)的需求已经超出了目前单模块探测器芯片的研制极限, 需要通过单模块探测器混成芯片进行精密拼接实现更大规模阵列, 满足各类航天应用平台的需求<sup>[1-2]</sup>。

红外探测器需封装在杜瓦内, 并与制冷机建立热连接, 利用杜瓦高真空绝热原理来保证红外焦平面芯片工作在低温环境。杜瓦的热负载是表征杜瓦绝热能力的综合指标<sup>[3-4]</sup>, 其大小是红外整机设计人员选择制冷机的一个重要指标。传统的微杜瓦如图1所示, 由于尺寸的限制已不适用于大规模拼接型探测器封装。对于拼接型探测器封装, 通常采用杜瓦制冷机集成式耦合封装<sup>[5]</sup>, 也称为冷箱封装如图2所示。

相比微杜瓦封装, 冷箱封装探测器焦面直接安装

至制冷机冷指平台上, 而微杜瓦封装冷指采用插入式方式与探测器杜瓦热耦合。微杜瓦热负载测量采用在冷指芯柱中灌入液氮, 通过测量一定时间内液氮蒸发量而得到杜瓦热负载, 这种热负载测量方法有很大的局限性, 一是只适用于插入式微杜瓦热负载测量, 不适用于冷箱封装热负载测量; 二是只能测得液氮温度(77 K)下杜瓦热负载, 对于长波谱段探测器, 通常工作在60 K温度, 其杜瓦热负载通过测得焦面在液氮温度下热负载外推至焦面温度为60 K时杜瓦热负载, 存在很大的不确定性。本文介绍了一种冷箱封装杜瓦热负载实验测量方法, 可以测得不同探测器工作温度下杜瓦热负载, 还可以得到不同杜瓦外壳温度时杜瓦的热负载, 这在实际工程应用中具有重要意义。

### 1 冷箱封装热负载计算分析

杜瓦热负载由探测器引线传导漏热 $Q_L$ 、探测器杜瓦外壳与冷屏间辐射漏热 $Q_{SCR}$ 、窗口与探测器冷屏间辐射漏热 $Q_{AP}$ 组成, 如图3所示。

收稿日期: 2017-12-19; 修订日期: 2018-02-23.

作者简介: 徐圣亚(1987-), 男, 安徽濉溪县人, 硕士, 工程师, 研究方向: 红外探测器在红外遥感中应用。E-mail: xusy508@foxmail.com.

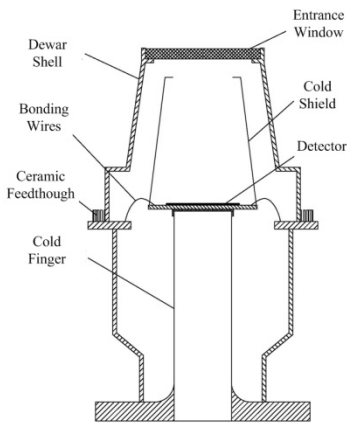


图1 微杜瓦结构示意图

Fig.1 Schematic of micro dewar structure

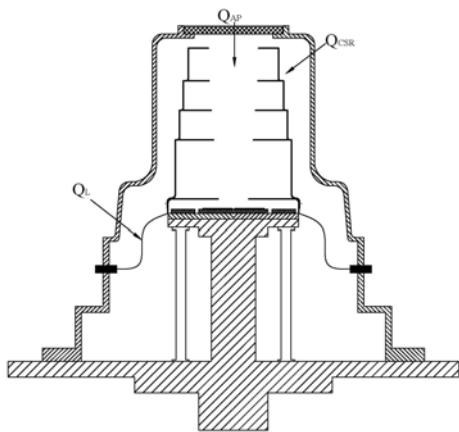


图3 冷箱封装热负载示意图

Fig.3 Schematic of thermal load of dewar in cold cabinet packaging

探测器引线传导漏热等效成沿探测器引线的一维热传导:

$$Q_L = n \frac{A}{L} \int_{T_2}^{T_1} k dT \tag{1}$$

式中:  $Q_L$  为探测器引线传导漏热, W;  $n$  为探测器引线根数;  $A$  为单根探测器引线截面积,  $m^2$ ;  $L$  为单根探测器引线长度, m;  $T_1$  为探测器引线接插件端温度, K;  $T_2$  为探测器引线探测器端温度, K;  $k$  为探测器引线热传导率, W/(m·K)。

探测器杜瓦外壳与冷屏间辐射漏热, 可以等效成两个同心圆柱间的辐射传热:

$$Q_{SCR} = \frac{\sigma A_1 (T_3^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \tag{2}$$

式中:  $\sigma$  为斯忒藩-玻尔兹曼常数, W/( $m^2 \cdot K^4$ );  $A_1$  为冷屏外表面辐射面积,  $m^2$ ;  $A_2$  为杜瓦内表面辐射面积,  $m^2$ ;  $\varepsilon_1$  为冷屏外表面发射率;  $\varepsilon_2$  为杜瓦内表面发射率;  $T_3$  为冷屏外表面温度, K;  $T_4$  为杜瓦内表面温度, K。

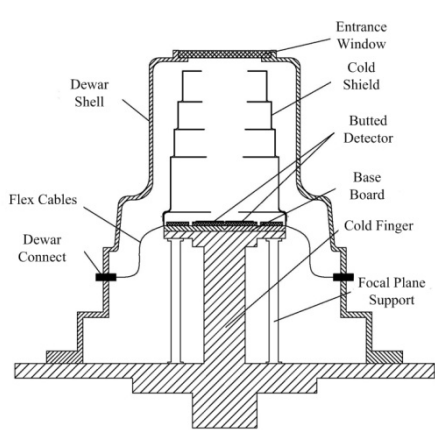


图2 拼接型探测器杜瓦结构示意图

Fig.2 Schematic of butted detector dewar structure

窗口与探测器冷屏间辐射漏热, 可以等效成两个平行平面间的辐射传热:

$$Q_{AP} = \frac{\sigma (T_5^4 - T_6^4)}{\frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_3} + \frac{1 - \varepsilon_4}{\varepsilon_4 A_4} + \frac{1}{A_3 F_{12}}} \tag{3}$$

式中:  $\sigma$  为斯忒藩-玻尔兹曼常数, W/( $m^2 \cdot K^4$ );  $A_3$  为窗口内表面辐射面积,  $m^2$ ;  $A_4$  为冷屏顶部表面辐射面积,  $m^2$ ;  $\varepsilon_3$  为窗口内表面发射率;  $\varepsilon_4$  为冷屏外表面发射率;  $T_5$  为窗口内表面温度, K;  $T_6$  为冷屏顶部表面温度, K;  $F_{12}$  为窗口对冷屏的辐射角系数 (保守计算可取为 1); 则杜瓦热负载  $Q_{DEWAR} = Q_L + Q_{SCR} + Q_{AP}$ , 由 (1)、(2)、(3) 式计算可得, 不同杜瓦表面温度时, 焦面 60 K 时杜瓦的热负载, 计算结果见表 1。该热负载不包含杜瓦内探测器电功耗, 一般称为杜瓦的静态热负载<sup>[6]</sup>。

表1 不同杜瓦温度下杜瓦的热负载计算结果

Table 1 Calculated data of thermal load of dewar at different shell temperatures	
Temperature of dewar shell	Thermal load of dewar @60K
20℃	2.24 W
0℃	1.79 W
-10℃	1.60 W

2 热负载实验测量方案

由于杜瓦的全部漏热均由制冷机带走, 根据热平衡原理, 杜瓦在一定工作温度下热负载即为该温度下制冷机冷平台的净冷量。通过在封装前测得制冷机在探测器工作温度下的功率-冷量曲线, 封装后根据焦面到温时制冷机所需的功率, 查得该功率温度下制冷机的冷量即为杜瓦的热负载。

首先根据图 4 所示实验装置, 对制冷机冷量进行标定。制冷机放置在真空罐内, 制冷机热端与压缩机

采用热管与辐射板连接。通过加热补偿方式控制两辐射板温度，改变制冷机热端温度和压缩机温度。冷指冷端安装电阻加热块模拟热负载，恒定制冷机输入功率及热端和压缩机温度，调节模拟热负载，使冷端温度恒定在 60 K，即该模拟热负载值为该输入功率及环境温度下的制冷机制冷量。改变热端温度及输入功率，测得不同组合时制冷机制冷量，从而得到不同热端温度时制冷机功率-制冷量曲线。

图 5 所示为探测器制冷机组件热负载实验测量装置，探测器制冷机组件安装在转运工装上，放置在真

空罐内小仓中，转运工装与小仓底板隔热连接，控制小仓温度在  $18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。制冷机热端与压缩机分别采用两块独立的辐射板散热，杜瓦外壳与制冷机热端导热连接，通过加热补偿方式控制两辐射板温度，从而可以改变制冷机热端温度及杜瓦外壳温度。制冷机通过制冷机控制器加电，制冷机控制器输出通过交流功率计监测，控制制冷机输入功率，使焦面温度稳定在 60 K，记录此时制冷机输入功率，根据此时输入功率查制冷机功率-制冷量曲线得出该温度环境下制冷机制冷量，则该制冷量即为杜瓦的热负载。

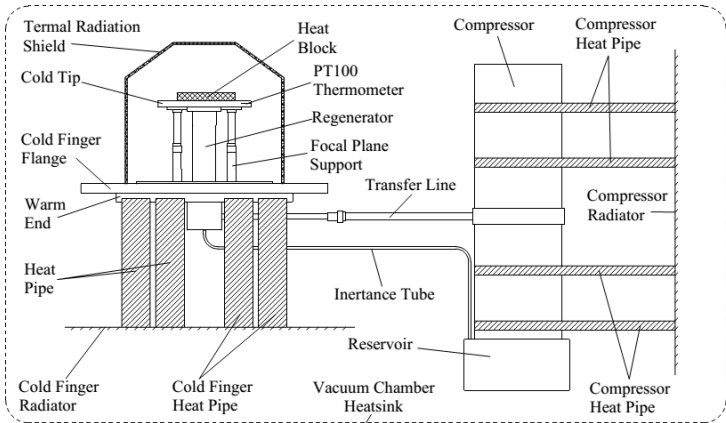


图 4 制冷机冷量标定实验装置示意图  
Fig.4 Schematic of cryocooler cooling capacity calibration device

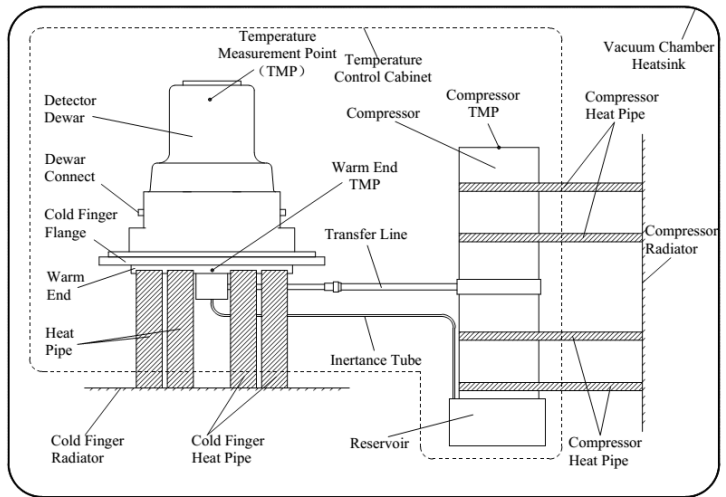


图 5 探测器制冷机组件热负载测量实验装置示意图  
Fig.5 Schematic of dewar cooler assembly(DCA) thermal load measurement device

3 实验结果与讨论

本实验选用的制冷机为脉冲管制冷机，其制冷量主要受制冷机热端温度影响。图 6 所示为制冷机在不同热端温度下，输入功率与制冷量之间的关系，制冷机制冷量随着热端温度降低而增大。

实验测得不同杜瓦外壳温度下，焦面温度 60 K 时制冷机输入功率，如图 7 所示。根据不同杜瓦外壳温度对应的制冷机输入功率查图 6，得到不同杜瓦外壳温度时，制冷机的制冷量，即杜瓦的热负载，如表 2 所示。

随着杜瓦外壳温度降低，杜瓦内部引线漏热、辐射漏热均降低，因此杜瓦热负载也随之降低，制冷机

输入功率也随之降低。实验实测值偏小于计算值，热负载计算时采用了等效模型进行简化，以及杜瓦内部各部件材料的物性及表面状态未有实测值，其计算时的取值可能与实际状态有差异，因此杜瓦热负载计算值与试验值有所偏差。

表 2 所示，杜瓦外壳温度从 20℃ 降至 0℃，杜瓦热负载减小 20%，图 7 所示制冷机输入功率减小了 32.6%。图 6 所示，制冷机在相同输入功率下，热端温度与制冷量成反比，即随着热端温度降低制冷机制

冷量增加。实际工程应用中，杜瓦外壳与制冷机热端导热连接，杜瓦外壳温度与制冷机热端温度基本相同，制冷机热端热量通过星上热管传导至星上散热面散出。因此，降低杜瓦外壳温度，一方面有利降低杜瓦热负载减小制冷机输入功率；另一方面有利于提高制冷机制冷量。由于星上散热资源有限，实际不可能无限降低杜瓦外壳温度，需根据实际情况进行优化设计，选择合理杜瓦外壳控温点。

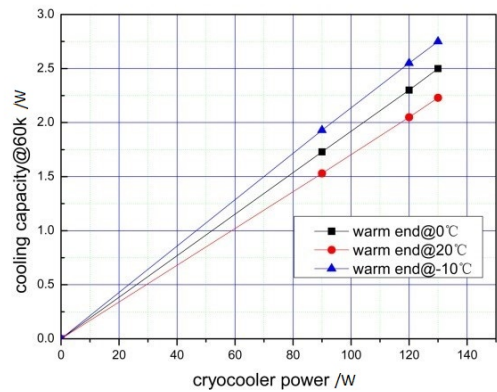


图 6 制冷机功率-制冷量曲线

Fig.6 Cryocooler power versus cooling capacity

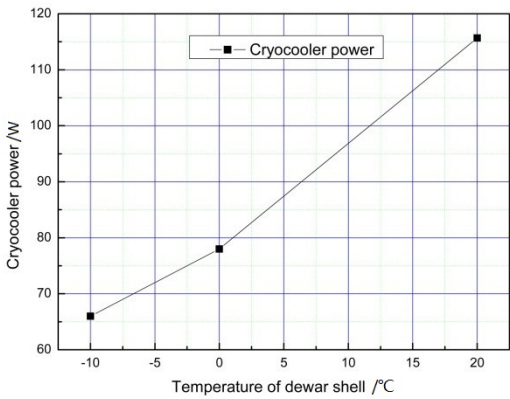


图 7 杜瓦外壳温度-制冷机功率曲线

Fig.7 Temperature of dewar shell versus cryocooler power

表 2 不同杜瓦温度下杜瓦的热负载

Table 2 Measured data of thermal load of dewar at different shell temperatures

Temperature of dewar shell	Thermal load of dewar @60 K
20℃	2 W
0℃	1.6 W
-10℃	1.5 W

4 结论

本文设计并搭建了大规模探测器杜瓦热负载测试实验装置，测得长波杜瓦组件不同外壳温度下的热负载，为实际工程应用提供了重要数据，能够指导探测器组件的制冷机选型及组件星上热设计。

参考文献：

[1] 龚海梅, 邵秀梅, 李向阳, 等. 航天先进红外探测器组件技术及应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3129-3140.  
GONG Haimeil, SHAO Xiumei, LI Xiangyang, et al. Advanced technology and application of spaceborne infrared detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3129-3140.

[2] 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.  
WANG Chenggang, DONG Haijie. Butted manner analysis of long linear infrared focal plane detectors of MCT[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(8): 920-923.

[3] 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.  
LI Jianlin. The Effect of frosting on the measurement of thermal load of mini metal dewar[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(12): 724-729.

[4] 林国华, 孟令伟. 杜瓦热耗的影响因素分析[J]. 激光与红外, 2017, 47(2): 195-196.  
LIN Guohua, MENG Lingwei. Analysis on influence factors of dewar heat consumption [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(2): 195-196.

[5] 闫春杰, 潘雁频, 许国太, 等. 斯特林制冷机与红外探测器耦合集成技术[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(2): 64-67.  
YAN Chunjie, PAN Yanpin, XU Guotai, et al. Study on coupling technology between the stifling cryocooler and IR detectors[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(2): 64-67.

[6] 李建林, 刘湘云, 朱颖峰, 等. 红外焦平面探测器杜瓦组件真空失效及其检测方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2874-2879.  
LI Jianlin, LIU Xiangyun, ZHU Yingfeng, et al. IR FPA dewar device vacuum failure and its test method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 2874-2879.