

## 冷屏对红外探测器组件降温影响研究

孙 闻<sup>1,2</sup>, 夏晨希<sup>1,2</sup>, 李 俊<sup>1</sup>, 王小坤<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**冷屏是制冷型红外探测器组件的重要组成部分并伴随探测器一起降温, 所以不同技术状态冷屏对红外探测器组件降温会有影响。本文针对  $320 \times 256 \times 30 \mu\text{m}$  规模红外探测器用 F2 冷屏, 通过对不同技术状态冷屏在相同冷平台下的降温实验, 研究对应技术状态冷屏对降温过程的影响情况, 并获得了各冷屏技术状态对应的影响量。本文结果对优化冷屏热学设计有一定借鉴意义。

**关键词:**红外探测器; 冷屏; 制冷

**中图分类号:** TN214 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.10.018

## Research on the influence of cold shield on the cooling process of infrared detector assembly

SUN Wen<sup>1,2</sup>, XIA Chen-xi<sup>1,2</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-kun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detector, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The cold shield is an important part of the infrared detector assembly, and it will be cooled with the detector. Aiming at F2 cold shield for the  $320 \times 256 \times 30 \mu\text{m}$  scale infrared detector, through cooling experiment with different technical conditions of cold shield in the same cold platform, the influence of the corresponding technical conditions of cold shield on the cooling process was studied, and the corresponding results were obtained under different technical conditions of cold shield. The results provide a reference for optimizing the thermal design of cold shield.

**Key words:** infrared detector; cold shield; refrigeration

### 1 引 言

冷屏是红外探测器组件杜瓦的重要组成部分, 其功能主要是为探测器提供较低的背景噪声环境。杂散光抑制设计合理的冷屏<sup>[1]</sup>可降低红外探测器背景噪声的同时提高信噪比。但由于冷屏机械结构的存在, 其自身热容量及表面辐射换热均不可避免地对红外探测器组件降温过程带来不利影响<sup>[2]</sup>。对于启动速度有严格要求的红外装置或仪器设备, 进行冷屏对降温过程影响研究就尤为必要。本文结合常见的冷屏制备技术途径, 提出几种典型冷屏技

术状态, 并通过降温实验获得各技术状态对特定红外探测器制冷组件降温过程的影响情况。

### 2 冷屏设计

冷屏是红外探测器组件的关键零件之一, 目前对冷屏的研究主要集中在杂散光抑制及降低冷屏对组件冷端热负载影响两方面。在杂散光抑制中分为杂散光抑制结构设计<sup>[3]</sup>与冷屏黑化涂层设计<sup>[4]</sup>。而在降低冷屏对组件冷端热负载影响研究中, 主要分为低热容量冷屏材料选择及其制备方法和减小冷屏表面发射率。

## 2.1 降温过程热容量计算

冷屏由于材料、F数、遮光环级数等影响,致使同类规格冷屏的热容量也有较大不同。在红外探测器组件制冷降温过程中,被降温部分的热容量是影响制冷过程的关键因素。对于冷屏热容量的计算,一般需要通过查阅相应材料在降温温区内低温热物性参数曲线来对热容量进行积分计算。也可通过在降温温区内指定温度,以该温度下各材料比热容进行定性的热容量估算,给不同技术状态冷屏间的比较分析带来方便。

## 2.2 冷屏表面辐射漏热计算

为方便冷屏在组件上的辐射漏热的计算,可将冷屏与杜瓦窗口帽抽象成两个有顶的套筒模型。辐射漏热简化计算公式为<sup>[5]</sup>:

$$Q_r = \delta \cdot \varepsilon_n (T_1^4 - T_2^4) A_1$$

在计算冷屏侧壁与杜瓦外壳侧壁辐射换热时,其内外辐射面间的平均辐射系数为:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1 \varepsilon_2 / \left[ \varepsilon_2 + \frac{A_1}{A_2} (1 - \varepsilon_2) \varepsilon_1 \right]$$

其中,  $\varepsilon_1$  为冷屏表面发射率;  $\varepsilon_2$  率为窗口帽内壁表面发射率;  $A_1$  为冷屏表面积;  $A_2$  为窗口帽内侧面积。

在计算冷屏顶部与窗口间的辐射换热时,其平均辐射系数为:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1 \varepsilon_2 / [\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_2) \varepsilon_1]$$

各表面的发射率是影响辐射换热的主要因素。为降低辐射换热,一般在冷屏及杜瓦内表面进行低发射率表面处理,主要包括抛光和表面镀低发射率膜系,常用发射率参数参考值如表1所示<sup>[5-6]</sup>。

表1 发射率数据表

Tab.1 Emissivity data table

| 表面状态   | 80 K 发射率 | 300 K 发射率 |
|--------|----------|-----------|
| 红外窗口   | 0.94     | 0.94      |
| 滤光片    | 0.932    | 0.932     |
| 柯伐抛光面  | 0.048    | 0.08      |
| 金表面    | <0.01    | 0.03      |
| 银表面    | 0.01     | 0.02      |
| 不锈钢抛光面 | 0.2      | 0.24      |

## 2.3 材料热扩散系数

热扩散系数是度量材料传导热能力与其贮存热能力的物性,表达式为:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c}$$

其中,  $k$  为材料热导率;  $\rho$  为材料密度;  $c$  为材料比热

容。热扩散系数大的材料其在温度环境变化后重新到达新平衡态的时间短<sup>[7]</sup>,所以在讨论不同材料对降温过程影响时,可以通过热扩散系数来对材料进行评价。如表2所示,以20℃下纯镍与柯伐合金的热物性参数对热扩散系数进行计算,计算结果表明两种材料热扩散系数相差约4倍。说明相同情况下同等纯镍比柯伐在温度变化后重新达到平衡的时间更短。

表2 材料物性参数表

Tab.2 Material physical parameter table

| 材料 | 热导率<br>/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 比热容<br>/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 密度<br>/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 热扩散<br>系数 |
|----|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|-----------|
| 纯镍 | 92.1                                          | 460                                            | 8.8                          | 0.023     |
| 柯伐 | 16.5                                          | 352                                            | 8.3                          | 0.0056    |

## 3 冷屏对降温影响实验

### 3.1 实验方案

本实验针对320×256 30 μm 规模红外探测器用F2冷屏开展,通过控制变量法对不同技术状态冷屏对降温影响进行比较实验。如图1所示,搭建由制冷机杜瓦组件、制冷机电源、温度数据采集装置及计算机组成的冷屏降温测试实验平台。实验所选用制冷装载平台为我所自研的320×256 30 μm 规模红外探测器封装用集成式组件杜瓦,冷平台制冷控温温度为76 K,在冷平台及被测样品顶端分别设置有检测温度测温二极管,可实时采集温度信号。

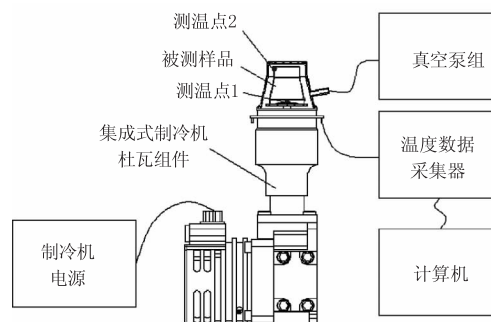


图1 测试平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of test platform

### 3.2 样品准备

根据冷屏测试实验平台测试要求,准备了4种F2后截距20 mm的相同规格不同技术状态的冷屏实验件,各实验件具体技术状态如表3所示。测试用冷平台及各实验样品均以20℃下比热进行的热容量计算,冷平台76~300 K条件下热容量约

237 J。

表 3 冷屏样品技术状态表

Tab.3 Technical condition of cold shield sample

|         | 样品 1    | 样品 2  | 样品 3      | 样品 4      |
|---------|---------|-------|-----------|-----------|
| 技术状态    | 可伐 + 抛光 | 电铸    | 样品 2 + 镀金 | 样品 3 + 铝箔 |
| 质量/g    | 2.20    | 1.50  | 1.52      | 1.53      |
| 冷屏热容量/J | 170.4   | 151.8 | 153.8     | 154.8     |
| 总热容量/J  | 407.4   | 388.8 | 390.8     | 391.8     |

其中样品 1 为柯伐材料的机加工冷屏,壁厚 0.2 mm,3 级遮光环结构;样品 2 为镍钴合金的电铸冷屏,壁厚 0.1 mm,4 级遮光环结构;样品 3 是在样品 2 基础上外表面抛光镀金处理;样品 4 是在样品 3 基础上使用铝箔粘接覆盖样品 3 冷屏开孔。

#### 4 实验结果

分别对四个样品在同一制冷平台上进行降温实验。降温结果如图 2 所示。

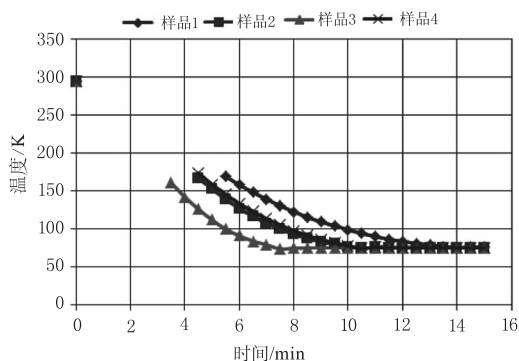


图 2 制冷温度曲线图

Fig. 2 Cooling temperature curve

由于本次实验使用 SDK104 型测温二极管进行温度检测,其对应的温度分度表的最高温度为 180 K,所以图 2 中室温至 180 K 不作统计。

通过表 4 可见,样品 1 的降温过程时间最长且冷屏温度梯度最大,样品 3 的降温过程时间最短,样品 4 的冷屏温度梯度最小。对数据进行进一步整理,得到冷屏相应技术状态对降温过程影响情况如表 5 所示。

表 4 冷屏降温实验情况

Tab.4 Result of cold shield cooling test

|          | 样品 1 | 样品 2 | 样品 3 | 样品 4 |
|----------|------|------|------|------|
| 制冷到温时间/s | 969  | 633  | 456  | 639  |
| 冷平台温度/K  | 76.2 | 76.1 | 75.7 | 75.5 |
| 冷屏顶温度/K  | 84   | 83   | 82.5 | 81   |
| 冷屏温度梯度/K | 7.8  | 6.9  | 6.8  | 5.5  |

表 5 冷屏降温试验数据比较表

Tab.5 Comparison of cold shield test data

|                        | 制冷到温<br>时间差值/s | 总热容量<br>比值 | 制冷到温<br>时间比值 | 冷屏温度<br>梯度差值/K |
|------------------------|----------------|------------|--------------|----------------|
| 材料影响<br>(样品 2—样品 1)    | -336           | 95.4%      | 68.4%        | -0.9           |
| 表面处理影响<br>(样品 3—样品 2)  | -177           | 101%       | 72%          | -0.1           |
| 通光孔影响<br>(样品 4—样品 3)   | +183           | 1          | 140.1%       | -1.3           |
| 材料及表面处理<br>(样品 3—样品 1) | -513           | 95.9%      | 47.1%        | -1             |

通过材料影响比较,镍基电铸冷屏相比柯伐机加工冷屏,其对组件制冷到温时间的减小量是较明显的,同时冷屏温度梯度也降低了 0.9 K。究其原因,一个是电铸冷屏热容量相对小,再有镍材料的热扩散系数较高,导致其最终到达热平衡的所需要的时间较柯伐更短所致。

通过表面处理比较,电铸冷屏表面镀金处理后,发射率的改善对组件制冷到温时间的减小也有较明显作用。另一方面也说明冷屏辐射漏热的增加对降温过程有一定影响。

通过通光孔有无比较,冷屏开孔覆盖后冷屏温度梯度得到改善。其原因是原本通过冷屏开孔向冷屏内部的投射辐射因为铝箔表面较低发射率而减小所致。

通过镀金电铸冷屏技术状态及柯伐机加工冷屏技术状态比较,前者在显著缩短组件制冷到温时间的同时,冷屏的温度梯度也有一定改善。

#### 5 结论

实验中对几种技术状态的冷屏进行了降温实验,实验结果表明:冷屏较高热扩散系数材料的选用及热容量的降低是影响降温过程的主要因素;冷屏外表面的低发射率表面处理也是影响降温过程的重要因素;降低冷屏内部自冷屏开孔处的投射辐射吸收量,是减小冷屏温度梯度的途径之一。

#### 参考文献:

- [1] XIA Wang, SUN Wen, WANG Xiao kun, et al. Study on stray light suppression IRFPA Dewar [C]. Proceedings of SPIE on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technology, 2012, 8417: 211-216.

- [2] CHEN Xing, HUA Hua, HE Kai, et al. Thermal stress analysis of IRFPA packaging assembly[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(6): 645–648. (in Chinese)  
陈星, 华桦, 何凯, 等. 红外焦平面探测器封装结构热应力分析[J]. 激光与红外, 2014, 44(6): 645–648.
- [3] YIN Shuang, ZHU Yingfeng, HUANG Yibin, et al. The stray radiation suppression of the baffles of infrared focal plane dewar[J]. Infrared Technology, 2015, 31(11): 916–920. (in Chinese)  
尹爽, 朱颖峰, 黄一彬, 等. 红外焦平面杜瓦冷屏挡光环杂散辐射的抑制[J]. 红外技术, 2015, 31(11): 916–920.
- [4] LI Xue. Study on infrared radiation absorbing coating of cold shield for infrared detector[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014: 47–61. (in Chinese)  
李雪. 红外探测器冷屏件高辐射红外吸收涂镀层研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014: 47–61.
- [5] SU Hongyi. Thermal leakage analysis of micro metal composite Dewar[J]. Aero Weaponry, 2002, (6): 28–30. (in Chinese)  
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.
- [6] LIU Chen. Experimental study on silver plating surface emissivity of the superconducting Tokamak thermal shield at super-low temperature[J]. Cryogenic, 2014, 42(3): 22–24. (in Chinese)  
刘辰. 托克马克冷屏表面超低温发射率实验研究[J]. 低温技术, 2014, 42(3): 22–24.
- [7] F P Incropera, D P DeWitt, T L Bergman, et al. Fundamentals of Heat and Mass Transfer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 41–43. (in Chinese)  
弗兰克 P 英克鲁佩勒, 大卫 P 德维特, 狄奥多尔 L 伯格曼, 等. 传热和传质基本原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 41–43.