超长线列红外焦平面杜瓦冷链设计

范广宇,范 崔,李 俊,龚海梅

(传感技术国家重点试验室,中国科学院红外成像材料与器件重点实验室,
中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

摘 要: 针对采用直线脉管制冷的超长线列红外焦平面器件杜瓦封装的需求, 提出了一种弹性冷链的设计方案。介绍了超长线列焦平面器件及直线脉管制冷机的特点以及对冷链的力学、热学要求,针对超长线列焦平面杜瓦冷链的设计思路、设计方法进行了研究,针对某型号脉管制冷机及典型超长线列探测器的尺寸、工作温度等要求,采用局部弹性冷链方案,通过有限元仿真工具对冷链进行优化设计,使其能够满足设计指标要求。根据设计结果制作了冷链及测试杜瓦,对冷链温差、器件拼接基板温度均匀性及低温形变进行了测试,并通过振动试验对力学可靠性进行了验证。试验结果证明局部弹性冷链设计方案的正确性和可行性。

关键词: 冷链; 杜瓦; 红外焦平面; 直线型脉管制冷机

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2021-06

Cold strap design of long linear IRFPA dewar

Fan Guangyu, Fan Cui, Li Jun, Gong Haimei

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A design scheme of flexible cold strap according to the requirement of long linear IRFPA packaging was presented in this paper, the characteristics of long linear IRFPA and linear pulse tube cooler were summarized, design ideas and design methods based on the mechanical and thermal requirements of cold strap were proposed. For typical butting substrate size and working temperature, used partial flexible cold strap scheme was used, which was optimized by FEM tool, design requirements was achieved. Test dewar was made according to the design result, temperature difference of cold strap, flatness and temperature uniformity of butting substrate were verified. The test dewar has passed vibration testing. The test results show that the design scheme is correct and feasible.

Key words: cold strap; dewar; IRFPA; linear pulse tube cooler

收稿日期: 2014-11-05; **修订日期:** 2014-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(61376052)

作者简介: 范广宇(1973-),男,高级工程师,博士生,主要从事红外光电探测器相关技术方面的研究。Email: fanguangyu@aliyun.com

导师简介: 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和基础研究。
Email: hmgong@mail.sitp.ac.cn

0 引 言

超长线列红外焦平面探测器是红外探测设备的关键元部件,目前已达到几千元的规模,线列长度达到 200 mm[1-2]。为满足大规模杜瓦漏热及器件焦耳热对大冷量制冷机的需求以及航天项目对制冷机工作寿命的要求不断提高，直线型脉管制冷机因其无运动部件、结构简单、可靠性高以及制冷效率高的特点而被广泛采用[3-4],由于直线脉管的结构与以往应用的斯特林制冷机膨胀机结构差异较大，因而封装杜瓦必须针对直线脉管进行设计和优化，其中冷链作为连接制冷机冷头与探测器基板的重要部件，必须满足热学、力学等方面的要求,文中针对长线列焦平面杜瓦冷链的设计思路、设计方法进行了研究,并通过试验对设计方法的有效性进行了验证。

1 设计原理

直线型脉管制冷机为了避免在冷头形成死空间以及气流反向所造成的气流紊乱以达到更好的制冷效率。将制冷机冷头放置在两个热端中间,几何构造与斯特林制冷机差别很大，无法与杜瓦实现插入式耦合,必须采用集成耦合方式,将制冷机冷头与焦平面探测器的拼接基板通过冷链进行连接。

冷链的主要作用是作为器件拼接基板与制冷机冷头间的导热通道,对超长线列探测器而言,冷链两端温差及器件拼接基板的温度均匀性是冷链设计的重要热学指标,这要求冷链具有较低的热阻,无氧铜(TU1) 由于热导率高且易于加工而成为冷链制作的首选材料。

由于冷链在室温下完成装配，当制冷机工作降温后,冷链将产生收缩,如果冷链为刚性连接,产生的热应力将造成焦平面器件拼接基板及脉管的变形，从而导致焦平面器件平面度超出光学系统焦深要求甚至探测器或制冷机损坏，因而冷链必须具有足够的弹性以释放热应力。在弹性的实现方式上有整体弹性冷链和局部弹性冷链两种设计方案,如 EOS AIRS[5-6]、IMAS[7]以及 TES 制冷机杜瓦组件采用的是局部柔性冷链，通过在宝石棒的一端焊接导热丝制成,GOES ABS 制冷机杜瓦组件采用的是整体柔性冷链,冷链由多层铝片制做而成。

直线型脉管可视为两端固定梁，为减少自身的传导漏热,脉管和回热器均设计为薄壁结构,但由于脉管冷头质量较小,脉管本身的刚度很好,当冷链安装至脉管冷头之上后,脉管部分的基频必然降低,为保证脉管的力学可靠性，必须使冷链对脉管产生的附加载荷降至最低。采用局部弹性冷链方案可以隔离脉管与杜瓦其它部分之间的振动，控制脉管冷头的附加质量。

2 长线列杜瓦模型及冷链设计指标

长线列探测器由规模较小探测器模块拼接而成，作者选择以 512×1 模块拼接 7 K 超长线列为例设计试验杜瓦，根据目前读出电路及电极引出板的典型尺寸，由此确定的模块拼接及电极引出板包络尺寸为 216 mm×40 mm。目前项目对超长线列探测器需求主要在短波和中波波段，因而 100 K 的器件拼接基板温度可以满足中短波器件的温度要求，冷链的设计指标见表 1。

表 1 设计指标

Tab.1 Design requirements

Items	Design requirements(dewar heat load 5W@100K)
Temperature difference between butting substrate and coldhead	≤7 K
Temperature uniformity of butting substrate	<2 K
Flatness of buttingsubstrate (PV, 100K)	<20 μm
Random vibration condition	20-100 Hz +3 dB/oct 100-600 Hz 0.056 g^2/Hz 600-2 000 Hz -9 dB/oct

红外焦平面探测器线列模块采用间接倒焊方式,根据低温可靠性要求[8],线列拼接基板采柯伐材料,基板厚度为 2.5 mm,为提高拼接基板刚度,在基板两侧增加 3 mm 宽,12 mm 厚的加强筋，基板两端增加安装接口,为保证器件拼接基板的温度均匀性,冷链通过多个连接面与器件拼接基板实现热连接,连接面处拼接基板加厚至 5.5 mm 以加工用于连接的 M3 螺孔，连接面越多对拼接基板的温度均匀性越有利,但会增加冷链加工及装配工艺的难度,根据以往经验及工艺可行性确定采用 4 个连接面，由此设计器件拼接基板如图 1 所示。

器件拼接基板通过高度为 46 mm 的薄壁杯状支撑安装在杜瓦上，脉管冷头与冷链的连接面设计为

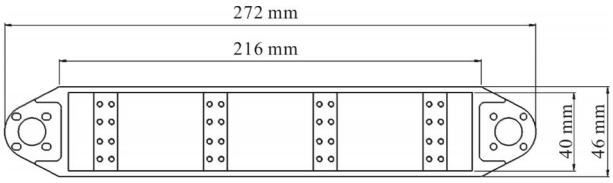

图 1 器件拼接基板设计

Fig.1 Design of butting substrate

40 mm×20 mm 的长方形，通过 4 个 M3 螺孔与冷链连接，采用直线脉管与线列平行放置的方案，脉管冷头中心与器件拼接基板中心对齐，为满足器件拼接基板形变测试对窗口面型精度要求，试验杜瓦采用 25 mm 厚的 K9 光学玻璃，窗口与器件拼接基板之间具有较小倾角，防止采用干涉仪测量器件拼接基板平整度时窗口表面干涉条纹造成干扰。

试验杜瓦模型的设计结果如图 2 所示。

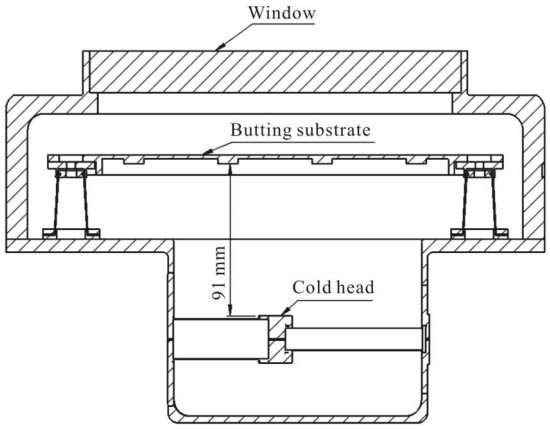

图 2 试验杜瓦设计模型

Fig.2 Design of test dewar

根据设计模型加工并装配试验杜瓦，所采用的直线脉管制冷机在制冷温度 95 K 时可提供 6 W 冷量，根据制冷机性能曲线以及制冷机输入功率，可以判断制冷机冷量即杜瓦的传导和辐射漏热，采用在冷链及杜瓦内壁粘贴镀铝聚纤亚胺薄膜的方式可将杜瓦漏热控制在 5 W@95 K 。

3 冷链设计及优化

3.1 分析模型建立

根据测试杜瓦设计确定的冷链接口建立冷链的初始模型及尺寸如图 3 和图 4 所示：

为易于实现温度均匀性指标，冷链设计成对称结构，矩形截面梁的惯性矩与与宽度成正比，与厚度的三次方成正比，因而冷链弹性部分都是采用将相互分开的多根导热丝或多片导热片两端形成良好热接触制成。在本设计中，内侧两冷链的弹性部分采用 5 片 0.25 mm 厚 *S* 形薄片组成，外侧冷链的弹性部分采用 6 片 0.25 mm 厚 *S* 形薄片组成，在 *Z* 方向将冷链进行四等分切割以增加冷链垂直于 *XY* 平面的形变能力，由图 4 中 *W*1、*W*2 定义冷链与器件拼接基板接触位置间距，每根冷链从弹性部分到顶部连接面的截面并非恒定，$\theta 1$、$\theta 2$ 为冷链两个面之间夹角。

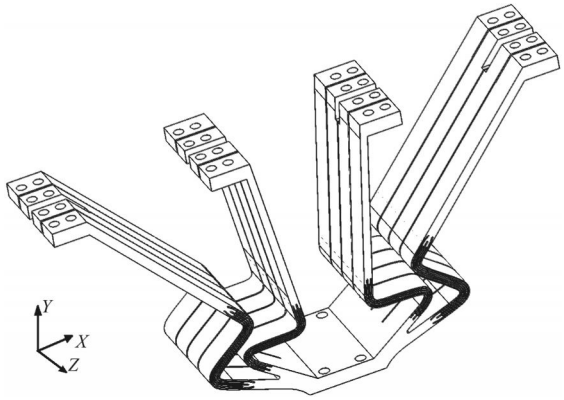

图 3 冷链三维视图

Fig.3 3D view of cold strap

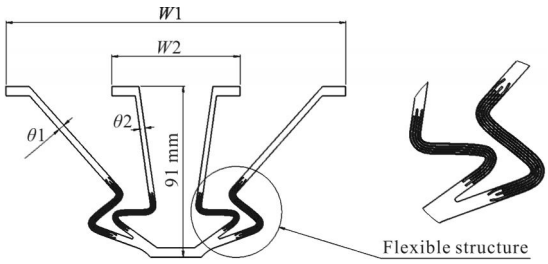

图 4 冷链设计尺寸

Fig.4 Design of cold strap

采用 ABAQUS 作为有限元分析工具，在将冷链及其它杜瓦零部件模型在 CAD 建模软件中经过必要的简化后导入 ABAQUS 建立有限元分析模型，模型中各部件的材料参数如表 2 所示。

表 2 有限元模型当中材料的参数

Tab.2 Material parameter of FEM modal

Material	Thermal conductivities /W·m^{-K}	Density /10^3 kg·m^3	Young's modules/GPa	Poisson's ratio
304 L	12.20	7.98	200	0.275
Kovar	17	8.3	157	0.32
TU1	381	8.9	108	0.34
FRP	0.4	1.75	13.3	0.22

由于与脉管、回热器以及杯状绝热支撑等薄壁结构相比,杜瓦外壳具有足够的刚度,因而在建立力学模型时可以将杜瓦外壳作为固定边界，所以力学分析模型只需要包括脉管制冷机、冷链、器件拼接基板以及杯状绝热支撑，边界条件为杯状支撑以及脉管制冷机于杜瓦外壳连接面的所有运动自由度设为零。力学有限元模型如图 5 所示。

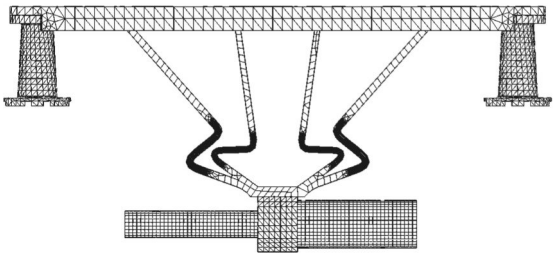

图 5 试验杜瓦力学有限元模型

Fig.5 Mechanics FEM model of test dewar

而在热学模型中由于脉管的冷量已经扣除了脉管及回热器的传导及辐射漏热，因而在热学模型中不需要包括脉管制冷机，热学的边界条件为在冷链与脉管冷头的安装面温度为 95 K 并有 5 W 的热流均匀流出，杯状绝热支撑与杜瓦外壳的安装面处温度为 300 K。热学有限元模型如图 6 所示。

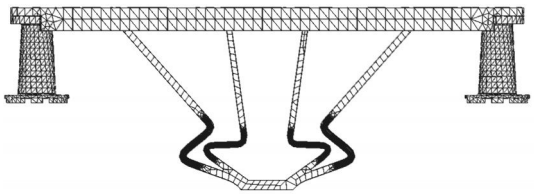

图 6 试验杜瓦热学有限元模型

Fig.6 Thermal FEM model of test dewar

3.2 冷链热学设计优化

冷链优化的初始状态是根据设计指标估算建立的，在热学优化过程中可以调节的参数为冷链图 4 中的 $W1$、$W2$ 以及 $\theta1$、$\theta2$。根据不同 $W1$、$W2$、$\theta1$、$\theta2$ 值调整有限元仿真模型并计算仿真结果，在总结规律的基础上继续调整模型参数，经过多轮迭代达到满足热学指标的设计结果。

首先将 $\theta1$、$\theta2$ 设定为 0,在对比仿真结果中发现 $W1$ 对于拼接基板温度均匀性起到决定性作用,拼接基板的温度场在外侧接连接面以外的温度梯度较大(见图 7)，因而 $W1$ 取值应接近器件拼接的长度,而 $W2$ 取值使得四个连接面等间距时器件拼接基板温度均匀性达到最优,最终确定 $W1$ 为 181 mm,$W2$ 为 68 mm。

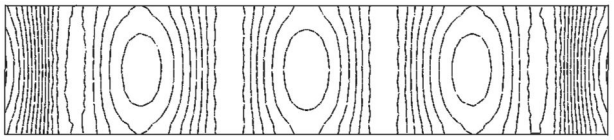

图 7 器件拼接基板温场分布

Fig.7 Temperature field distribution of butting substrate

考虑到冷链与器件拼接基板和脉管冷头之间的接触热阻，将冷链本身温差的设计目标确定为 5K@5W,在前一轮优化结果的基础上调节 $\theta1$、$\theta2$ 以增加冷链热导,减小冷链温差,同时保证器件拼接基板的温度均匀性满足设计指标，由此确定 $\theta1$、$\theta2$ 的最终设计值分别为 0.31°和 0.29°。

由此确定的冷链设计所对应的有限元仿真结果为器件拼接基板在模块拼接范围内的温度均匀性为 1.03 K,冷链两端温差为 4.8 K。

3.3 冷链力学验证

基于图 5 所示的力学有限元模型进行模态分析,提取该模型的前 40 阶模态,其中部分模态的频率如表 3 所示。

表 3 模态分析结果

Tab.3 Result of modal analysis

Mode	Frequency/Hz
1	162.18
7	393.98
22	796.31

根据仿真结果各阶次所对应振型可以看出 1~6 阶振动为冷链本身柔性部分的局部振动，对器件拼接基板和脉管影响很小,7 阶振型为器件拼接基板沿 Y 方向振动，冷链的弹性部分很好的隔离了器件拼接基板振动对脉管的影响,至 22 阶振动才是脉管本身的振动。

建立脉管的力学模型，在脉管冷头上附加一定质量的载荷,使其基频达到 796.31 Hz,此时附加载荷的质量为 126.6 g，可见在 527 g 的冷链中仅有约 24%的等效质量成为脉管的载荷，根据脉管的力学实验结果，脉管在此附加载荷下可以通过表 1 中所列力学条件的振动试验。

4 测试及试验结果

4.1 拼接基板低温形变测试

采用无氧铜材料和慢走丝工艺加工冷链后进行清洗和镀金，由于冷链结构已经保证其具有足够的弹性，因而不需要对冷链进行退火，因为退火后的冷链会过于柔软而容易导致形变，不便于其在测试杜瓦内的安装。利用柯伐材料制作器件拼接基板并将基板的上表面抛光成镜面，以便于激光干涉仪可以透过测试杜瓦窗口测量器件拼接基板的表面形貌，加工其它测试杜瓦零件后完成测试杜瓦装配。

为测试方便，脉管未连接压缩机进行制冷，而采用测试杜瓦再外接液氮杜瓦并采用柔性铜带将脉管冷头与液氮杜瓦冷头连接将脉管冷头冷至 95 K 附近，将测试杜瓦窗口对准激光干涉仪光路，待倒入液氮降温后测试器件拼接基板平面度，测试结果如图8所示，拼接基板平整度的 PV 值为 15.5 μm。

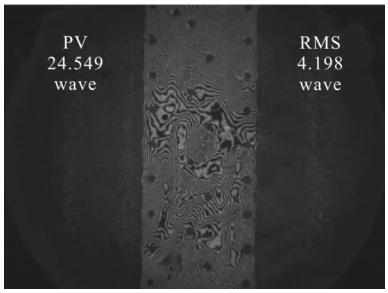

图 8 拼接基板平整度测试

Fig.8 Flatness test of butting substrate

4.2 冷链热性能测试

冷链热性能测试包括拼接基板温度均匀性测试及冷链温差测试，由图 7 可以看出，器件拼接基板沿短轴方向温度比较均匀，温度梯度主要存在于长边方向，为进行此试验，在器件拼接基板上模块拼接范围内沿长边方向均布 8 个经标定的 Pt100 测温电阻，在脉管冷头上安装 1 个经标定的 Pt100 测温电阻，记录每个 Pt100 的引线电阻以便在计算温度时扣除。将脉管连接压缩机，开机制冷后通过调节压缩机输入功率将脉管冷头温度稳定在 95 K，测量器件拼接基板上各 Pt100 的电阻值并反演出对应的温度值，拼接基板上测量的温度最高值与最低值之差为拼接基板的温度均匀性，拼接基板上温度最高值与脉管冷头间温差为冷链导热温差，经测试得到的最终结果为：器件拼接基板的温度均匀性为 1.66 K，冷链导热温差为 6.2 K，测试结果较设计值略高，这主要是由于冷链两端接触热阻的影响。

4.3 冷链力学性能试验

将测试杜瓦与制冷机压缩机安装在振动夹具上，再将夹具固定在振动台上进行振动试验。试验的流程如图 9 所示。

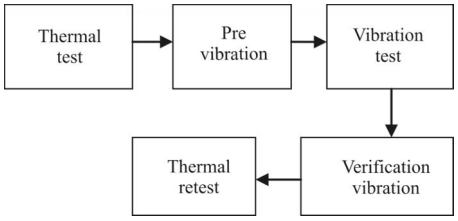

图 9 杜瓦力学试验流程

Fig.9 Flow chart of mechanical test

对比预复振的地振动响应测试曲线发现响应曲线没有变化，因而振动前后测试杜瓦结构没有发生改变，热性能测试通过对比振动前后测试杜瓦制冷至工作温度所需的制冷机输入功率、冷链两端温差以及器件拼接基板的温度均匀性，发现以上热学指标测试结果均未发生改变，因而可以判定所设计的局部弹性冷链及测试杜瓦通过力学振动试验。

5 结 论

文中对超长线列焦平面杜瓦组件所需弹性冷链的设计原理及设计方法进行了总结，并结合特定规模探测器及脉管制冷机所需测试杜瓦的冷链进行了设计和软件仿真，通过对实际测试杜瓦进行形变测试、热性能测试以及力学振动试验，验证了设计方案及设计结果的正确性。在实际杜瓦设计当中，冷链设计只是杜瓦设计的一部分，必须与杜瓦其它部分设计相结合才能达到设计目标，如器件拼接基板的平整度，仅靠弹性冷链只能部分消除器件拼接基板低温下的应力及形变，还需要结合拼接基板设计以及基板的装配设计和装配工艺才能达到平整度设计指标。

参考文献：

[1] Gong Haimei, Shao Xiumei, Li Xiangyang, et al. Advanced technology and application of spaceborne infrared detectors

[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 40 (12): 3129-3140. (in Chinese)
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, 2010, 40(12): 3129-3140.

[2] 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. 超长线列碲铬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.

[3] Chen Xiaoping. Status and trends of the cryocooler in IRFPA detector [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(1): 45-49. (in Chinese)
陈晓屏. 微型低温制冷技术的现状和发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 45-49.

[4] Radebaughr. Pulse tube cryocoolers for cooling infrared sensors[C]//SPIE, 2000, 4130: 363-379.

[5] James Rutter, Dave Jungkman, James Stobie, et al. A multispectral Hybrid HgCdTe FPA dewar assembly for remote sensing in the atmospheric infrared sounder (AIRS) instrument[C]//SPIE, 1996, 2817: 200-213.

[6] Roger C C, Kenneth E G, Thomas McKay, et al. Atmospheric infrared sounder(AIRS)thermal test program[C]//SPIE, 1999, 3759: 266-278.

[7] Chan C K, Nguyen T, Colbert R, et al. IMAS pulse tube cooler development and testing [C]//Cryocooler, 1999, 10: 139-147.

[8] Fan Guangyu, Gong Haimei, Li Yanjin, et al. Temperature cycling reliability of IRFPA device [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(4): 607-610. (in Chinese)
范广宇, 龚海梅, 李言谨, 等. 红外焦平面器件温度循环可靠性研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 607-610.