

# 超长线列红外探测器与制冷机耦合的柔性冷链发展现状

邓蔚, 孙鸿生, 朱颖峰, 徐冬梅, 李冉, 黄一彬  
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 随着航天技术对更大视场、更高分辨率的需求, 线列红外探测器规模越来越大, 传统的制冷机与红外探测器单点耦合方式, 已经无法满足超长线列红外探测器芯片温度均匀性的要求。结合国内外多家研究单位的设计及试验情况, 对各类柔性冷链进行了对比分析, 从热学性能及力学性能出发, 总结了各类柔性冷链设计的特点及其适用性。

**关键词:** 超长线列红外探测器; 制冷机; 耦合; 柔性冷链

**中图分类号:** TN215      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2020)01-0010-09

## Development Status of the Flexible Thermal Link Coupling Between Cryocooler and Long Linear Infrared Detector

DENG Wei, SUN Hongsheng, ZHU Yingfeng, XU Dongmei, LI Ran, HUANG Yibin  
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** With the demand of from space technology for a large field of view and higher resolution, the scale of line infrared detectors is increasing. Single point coupling mode fails to meet the temperature uniformity requirement of long linear infrared detector chips. This study compares and analyzes various types of flexible thermal links, based on the design and the testing outcomes from many domestic and international research institutes. The characteristics and applicability of the various flexible thermal link designs, in terms of thermal and mechanical properties, are summarized.

**Key words:** long linear infrared detector, cryocooler, coupling, flexible thermal link

### 0 引言

超长线列红外探测器组件目前已经达到几千元的规模, 线列长度达到 200 mm, 广泛使用在红外遥感应用中。由于红外探测器常需在低温下进行工作, 而机械制冷具有结构紧凑、体积小、重量轻、制冷量大、制冷时间短、制冷温度可控范围大等优点, 目前该类探测器在应用中大多采用机械制冷的方式。随着红外探测器面阵规模的变大, 小型杜瓦单点连接的耦合方式已经无法满足要求, 因此对超长线列探测器杜瓦与制冷机耦合方式提出新的需求。

本文从超长线列红外探测器与制冷机的耦合方式出发, 综合国内外的柔性冷链研究及发展现状, 对冷链设计及制作工艺进行分析。

### 1 超长线列红外探测器与制冷机耦合的研究现状

超长线列红外探测器与制冷机的集成式耦合有

两种实现的技术方法: 一种为钎焊式, 即制冷机的冷指直接通过钎焊与冷板焊接在一起, 考虑到焊接过程中的热匹配性, 冷板需采用膨胀系数较大的材料, 如钼铜, 但膨胀系数大的冷板将大大增加冷头设计的困难, 需在冷头上设计复杂的应力卸载结构, 并且因是单点冷源, 探测器焦平面上的温度均匀性很难保证, 如图 1 为“高分 5 号”卫星长线列红外探测器组件结构图<sup>[1]</sup>, 采用的就是钎焊式的耦合结构; 第二种为冷链式, 制冷机冷指通过冷链与冷板进行连接, 因制冷机不直接与冷板相接, 其冷头不需要复杂的应力卸载结构, 同时可根据焦平面上的温度均匀性需求, 来灵活调整热量传输结构, 并且可以通过隔振设计来降低制冷机传导至焦平面的振动, 如图 2 为上海技物所直线脉管集成耦合杜瓦结构<sup>[2]</sup>, 采用的就是冷链式的耦合结构。对于超长线列红外探测器, 为保证探测器的温度均匀性, 应采用冷链式的耦合方法, 因此冷链尤其是柔性冷链研究是超长线列红外探测器工程化的重点。

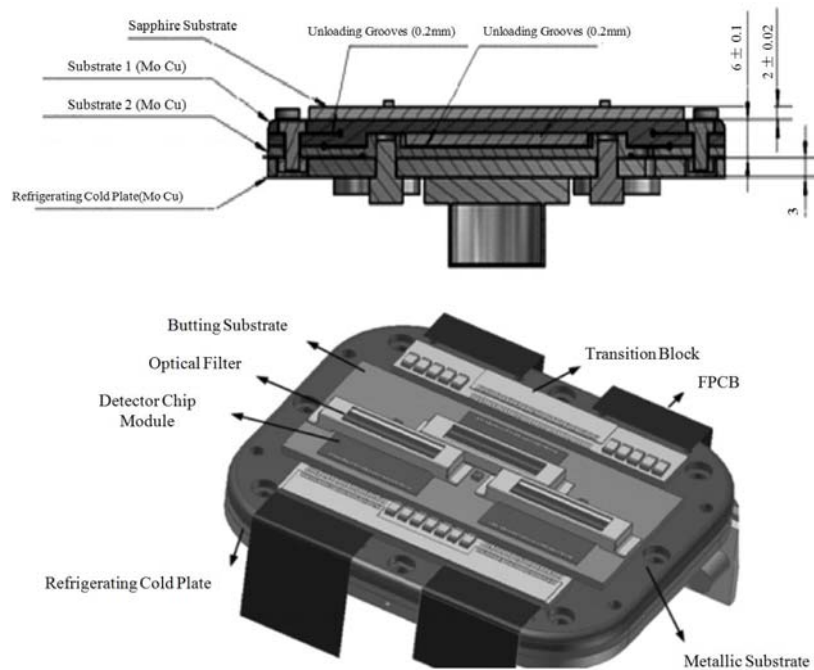


图1 “高分5号”卫星长线列红外探测器组件应力卸载结构图(上图)和焦平面结构图(下图)

Fig.1 Stress unloading structure (up) and focal plane structure (down) of GF-5 satellite linear infrared detector components

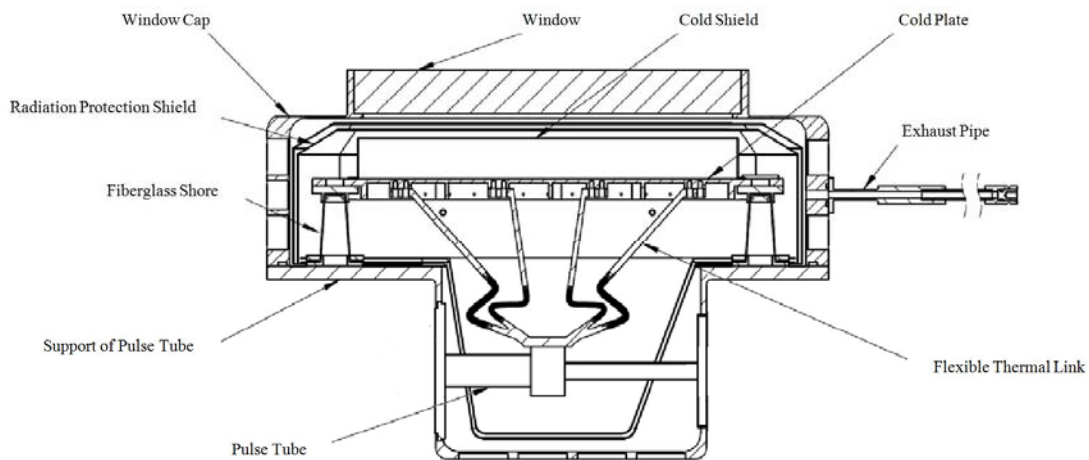


图2 上海技物所长线列红外探测器杜瓦结构图

Fig.2 Dewar structure of linear infrared detector designed by Shanghai Institute of Technical Physics

## 2 柔性冷链的国内外研究现状

### 2.1 柔性冷链的国外研究现状

#### 2.1.1 柔性冷链的结构

柔性冷链作为冷量传输渠道,能够更加灵活地分配冷量、隔绝振动,常应用于各种空间项目中。对于柔性冷链,国外已经做了大量的研究,并且已经有了成熟的冷链设计、加工方法和检测手段,柔性冷链按形状结构分类,可分为链状、片状、丝状和部分异形冷链。各种类型的冷链结构都是通过将冷链分割成多

层薄片或多根导热丝的方法,来减小冷链整体结构的惯性矩来获得结构的低刚度。但不同结构具有不同的应用领域。

链状冷链采用丝状材料编织而成的链状结构作为冷链的柔性部分,这种结构的冷链具有3个方向的自由度,能够在3个方向进行自由运动,但因链状结构制作工艺的问题,链状冷链比较难保持高清洁度,容易在使用过程中产生多余物,同时因这种结构表面积大,易吸附气体,故链状冷链不适在高清洁度和高真空度的环境下使用。

如图 3 所示，目前链状冷链主要有两种：一种是采用高纯度无氧铜丝编织而成的铜链，铜链能与铜热接头制成一体式冷链，并且制作工艺成熟，广泛应用在空间项目中，如表 1 所示为 TAI (Technology Applications Inc.) 公司统计的使用过链状铜冷链的空间项目，在空间项目中链状冷链最常使用的方式是与刚性槽道热管配合形成完整的热量传输系统，如图 4

为链状铜冷链的装配图；一种是采用捆扎的碳纤维管束作为柔性部分，配合铜或铝热接头的分体式柔性冷链，相比无氧铜，碳纤维在 100 K 温度以上具有更高的热导率，更小的密度和刚度，是能够替代链状铜冷链的新型链状冷链的制作材料，目前也已经在空间项目中大规模使用，如表 2 所示为 TAI 公司统计的使用过碳纤维管束冷链的空间项目。

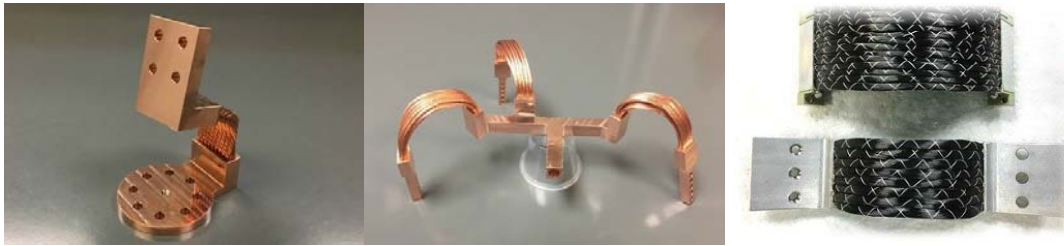


图 3 链状柔性冷链：无氧铜链状柔性冷链实物图（左图和中图）、碳纤维管束链状柔性冷链实物图（右图）

Fig.3 Chain-shaped flexible thermal link: flexible thermal link of oxygen-free copper (left and middle picture), flexible thermal link of carbon fiber bundle (right)

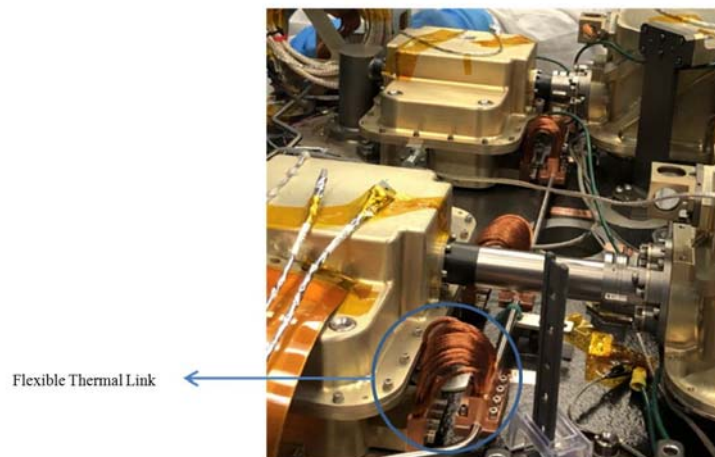


图 4 链状柔性冷链装配图

Fig.4 Assembly structure of chainlike flexible thermal link

表 1 采用铜冷链热传导的空间项目 Table 1 Space items using copper thermal link

Project name	Launch time
Lockheed Martin/NOAA's GOES-R	2016.11
NASA's OSIRIS REx	2016.9
Numerous Department of Defense Satellites	2016-2018
NOAA's GOES-S/T/U	2017-2018
NASA JPL's GRACE-FO	2018
Orbital ATK's Cignus OA-9 Spacecraft	2018.5
NASA's GEDI Sensor(on board the ISS)	2018.11
Eumetsat's METEOSAT	2020
NASA JPL's Deep Space Atomic Clock(DSAC)	2019.3
ESA's Solar Orbiter	2019.2

表2 采用碳纤维管柔性冷链热传导的空间项目

Table 2 Space items using carbon fiber bundle thermal link

Project name	Launch time
NASA's ORION Spacecraft	2015.11
JAXA's ASTRO-H(Hitomi)	2016.2
NASA JPL's GRACE-FO	2018.5
USAF's GPS III	2018.11
Numerous Department of Defense Satellite Programs	2016-2018
ESA&NASA's Spectral Imaging of the Coronal Environment(SPACE) instrument(on Solar Orbiter)	2020.2
Boeing's CST-100 Commercial Crew Vehicle	2019.7
DLR's EnMAP	2020
Ball Aerospace's GEMS UV-VIS Spectrometer(GEO-KOMP SAT-2B Satellite)	2019
NASA's IXPE Mission	2021

1996年荷兰的S. Dolce针对碳纤维的高热导率,使用二百万根直径为0.01 mm的碳纤维管束制作了一种柔性冷链,该冷链采用了“C”形结构来减小Z方向的刚度,在碳纤维管束的上下两端使用铝块压紧,冷链外围用聚酯薄膜包裹,来减小辐射漏热的同时防止碳碎屑飞出,其结构如图5所示<sup>[3]</sup>。在后续试验中,该冷链包括上下铝块及耦合处其总体的热导率能够达到300 K下1.3 W/K, 100 K下0.7 W/K;该冷链X, Y轴上的刚度在300 K温度下空气中为0.75 N/mm,

在100 K温度下真空中为2.5 N/mm,其Z轴的刚度在300 K温度为3.5 N/mm。

因在高真空或高清洁的环境内,链状冷链会污染环境不能使用,需考虑其他方式的柔性冷链结构,而以铜箔、铝箔或柔性石墨为主体的片状柔性冷链能够比较好地满足要求,片状柔性冷链能够较好地清洁,并且表面积相对较小,尤其是只需要考虑两个方向的自由度时,片状柔性冷链是最好的选择,常被使用于各类探测器中,如图6所示。

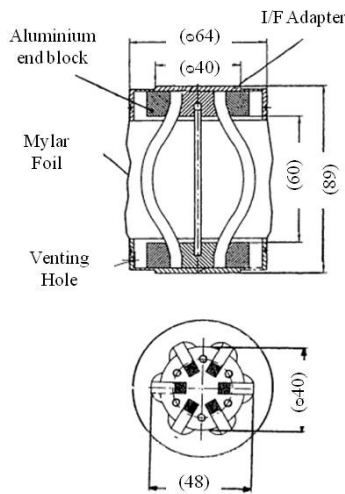


图5 碳纤维管柔性冷链结构示意图(左图)和实物图(右图)

Fig.5 Structure sketch(left) and physical map(right) of carbon fiber bundle thermal link



图6 片状柔性冷链:铜片状冷链(左图)、铝片状冷链(中图)、石墨片状冷链(右图)

Fig.6 Foil thermal straps: copper foil thermal straps(left), aluminum foil thermal straps(middle), graphite foil thermal straps(right)



1997 年美国航天局发射的 MIDAS (The Materials In Devices As Superconductors) 中采用了 11 片 0.1 mm 厚的铜薄片组成的柔性冷链, 来连接高温超导材料与制冷机冷头, 该冷链的两端采用螺钉固定紧压, 在固定处为了减小接触热阻在接触点处垫入了钢片, 该冷链能在隔绝制冷机振动同时具有高的热导率, 最终使高温超导材料与制冷机冷头之间的温差小于 2 K<sup>[4]</sup>, 结构如图 7 所示。

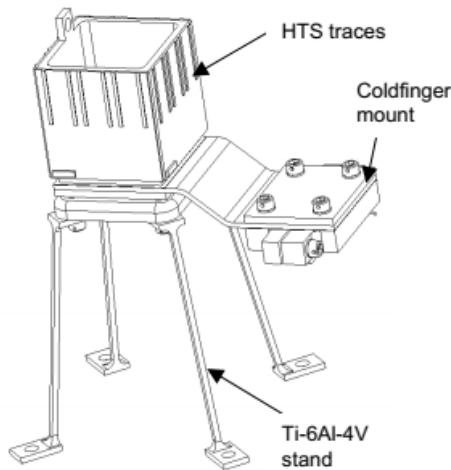


图 7 MIDAS 传热结构图

Fig.7 MIDAS heat transfer structure

美国国家海洋和大气局发射 GEOS (Geostationary Operational Environmental Satellite) ABS (Advanced Baseline Sounder)<sup>[5]</sup> 中的杜瓦组件中由于冷头位置距离探测器较远, 因而制冷机冷头通过柔性冷链连接到焦平面器件的安装面, 柔性冷链由多层铝片组成, 在低温下仍可保持一定的柔性, 可以消除冷链低温收缩所产生的应力, 采用铝作为冷链材料可以在低温下获得与铜接近的热导, 重量上比铜要轻, 有利于组件的轻量化和振动条件下的可靠性, 结构如图 8 所示。

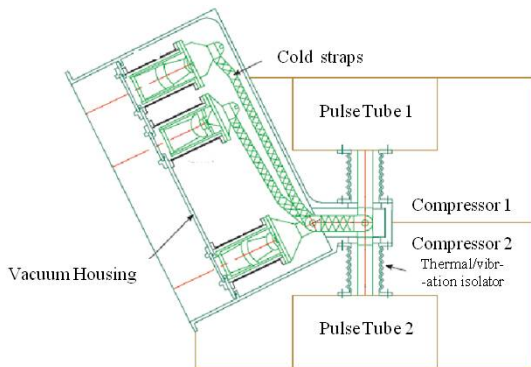


图 8 GEOS 杜瓦组件结构图 Fig.8 GEOS dewar structure

当需考虑 3 个方向自由度, 且应用于高真空度, 高清洁度的环境中时, 可采用金属丝进行连接。1996 年美国航天局发射的 EOS (Earth Observing System)

AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)<sup>[6]</sup> 中的杜瓦组件陶瓷基板通过局部柔性冷链与冷头连接, 局部柔性冷链与基板的连接端由铝制成, 与冷头的连接端设计为由多根金属丝连接的两块金属板, 金属丝实现了冷链的局部柔性, 两个连接端之间为镀金的宝石棒, 宝石在该杜瓦的工作温度 60 K 具有很高的热导率, 可以有效地降低冷链的导热温差, 宝石棒通过焊接与两连接端连接, 采用此局部柔性冷链设计可以使得低温下产生的热应力通过冷链弹性部分得以释放, 同时可以隔离探测器与制冷机冷头之间的振动耦合, 结构如图 9 所示。

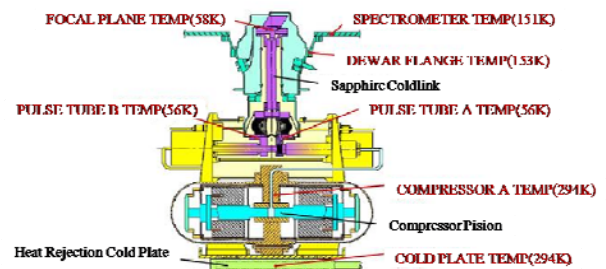


图 9 AIRS 杜瓦组件结构图

Fig.9 AIRS dewar structure

除了以上较为常规的冷链结构, 也有一些较为特殊的柔性冷链结构。日本的 Masahiro Sugimoto 为了保持 SIS (superconducting-insulator-superconducting tunnel junction)<sup>[7]</sup> 系统温度的同时不受机械制冷机振动的影响, 采用了如图 10 所示柔性的连接方式。该连接整体采用无氧铜材料, 支撑部分厚度为 0.3 mm, 并沿轴方向开了 120 条竖槽从而减小整体的刚度, 该连接在外圈用尼龙绳固定压紧, 同时通过尼龙与铜之间的热膨胀系数的差异, 温度越低尼龙绳固定压紧的力越大。通过测试该耦合结构在 80 K 温度下热导率达到 4 W/K, 12 K 温度下热导率达到 2.3 W/K, 同时该耦合结构能将由制冷机带来的振幅由 30 μm 减至 6 μm。

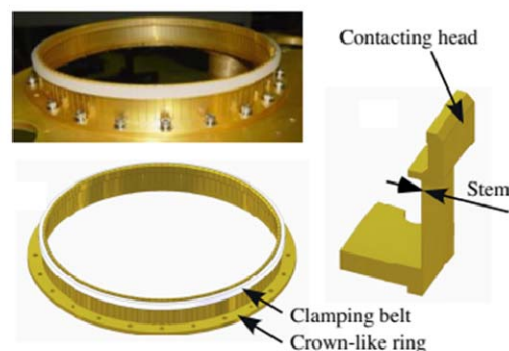


图 10 SIS 系统中传热的柔性结构

Fig.10 The flexible structure of heat-transfer in SIS systems

### 2.1.2 柔性冷链的材料

柔性冷链采用的材料有3种大类:铜、铝及石墨材料。如图11为这几种材料在不同温度下的热导率图,在红外探测器使用的温度区80K~100K左右,无氧铜的热导率最大,柔性石墨材料其次,1100号铝金属热导率最低。同时考虑冷链本身的重量,以热导率比密度值作为衡量的标准,结果如表3,在这3种材料中,热导率比密度值石墨最大,铝其次,铜最小。故在空间应用中,相同质量下,冷链使用石墨传热效果最佳,铝其次,铜最差。除材料本身的性质之外,柔性冷链中制作工艺的选择对冷链整体的热导率及可靠性至关重要。国外对这些方面已经做过大量的工作。AS(Absolut System)公司的T. Trollier对不同纯度的铝金属的热导率进行了测量,测量结果如表4和图12所示(图中4N、5N、6N代表铝金属的纯度的高低,如4N表示铝金属的纯度为99.99%),当铝金属中铝的纯度越大时,其热导率越高,纯度为99.999%铝金属低温下的热导率是纯度为99%铝金属热导率的1~2倍。同时,T. Trollier对铝箔与铝热接头的焊接工艺、铜箔与铜接头的焊接工艺和铜箔与铝接头的焊接工艺进行了实验和测量,结果如表5所示。结果表明,铝箔与铝热接头的焊接采用离子束焊接效果最好,铜箔与铜接头的焊接采用压焊及离子束焊接的效果最好,铜箔与铝接头的焊接采用钎焊的效果最好,这些焊接都能够达到焊接处牢固且无接触热阻产生<sup>[8]</sup>。

石墨材料具有高热导率、良好的力学性能和低密

表3 铜、铝和石墨材料部分参数对比表

Table 3 Comparison of partial parameters of copper, aluminum and graphite materials

	Thermal Conductivity under 80 K/(W/m·K)	Density/(g/cm <sup>3</sup> )	Thermal conductivity/Density
OFHC Cu	558	8.9	62.7
1100 Al	283	2.7	104.8
GraFlex	300	1.8	166.7

表4 纯度不同铝金属与无氧铜的热导率

Table 4 Thermal conductivities of aluminum with different purities and copper

T/K	Thermal conductivity(W/m·K)				
	Aluminum grade		Copper		
	1100	1050	4N	5N	OFHC
50	369	425	948	1087	1173
60	338	389	645	695	816
70	308	354	484	507	646
80	283	326	390	401	558
Purity %	99	99.50	99.990	99.999	99.99

度,是制作柔性冷链最理想的材料,如图13所示为部分柔性石墨冷链的示意图。对于石墨柔性冷链,主要的难点是石墨柔性部分和刚性部分连接的可靠性,以及如何解决石墨材料因各向异性的热导率带来的温度梯度问题。

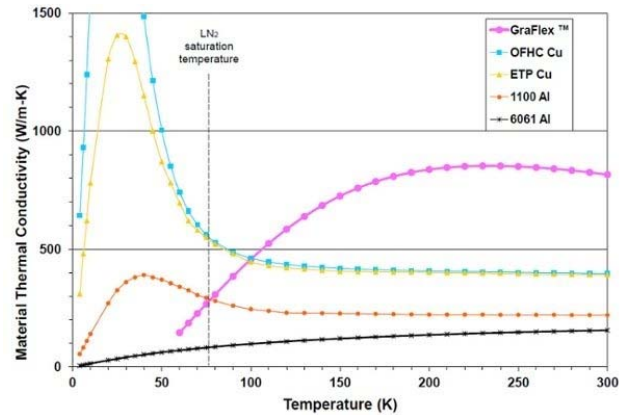


图11 不同温度下几种高传热材料的热导率

Fig.11 The thermal conductivity of several materials with high-transfer performance at different temperatures

美国的 Mark J. Montesano 设计了一种以 APG (annealed pyrolytic graphite) 为主体,使用铝薄片进行封装的复合材料制造的柔性冷链<sup>[9]</sup>,在铝薄片和 APG 之间通过连接剂进行粘接,通过调整铝薄片、APG 及连接剂的厚度,该复合材料最高能够达到 1105 W/mK 的热导率,结构如图14所示。

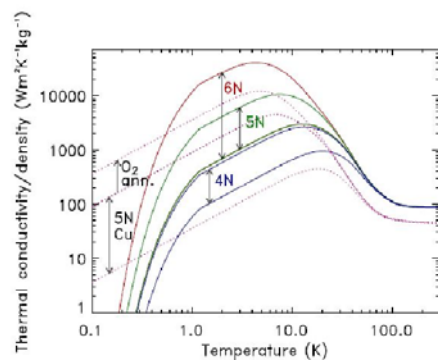


图12 铝金属和无氧铜的热导率对比图

Fig.12 Comparison of thermal conductivity between aluminum and copper

表 5 不同金属箔与热接头间焊接工艺研究

Table 5 Feasibility study of assembling processes according to the foils and fittings materials

Processes available for foil assembly	Aluminum foils and aluminum fittings	Copper foils and copper fittings	Copper foils and aluminum fittings
TIG/MIG	Good but not critical on foils	Good	Not feasible
Press-welding	Not feasible	Very good no thermal resistance between foils	Not feasible
Diffusion welding	Feasible with force applied during process	Good no deformation and good performance	Feasible with force applied during process
Laser welding	Feasible but spot welding only	Feasible but spot welding only	Not feasible
EB welding	Very good no thermal resistance between foils	Very good no thermal resistance between foils	Not feasible
Brazing	Good with additional thermal resistance	Good with additional thermal resistance	Good with additional thermal resistance
Swaging	Good with additional contact resistance between foils	Good with additional contact resistance between foils	Good with additional contact resistance between foils

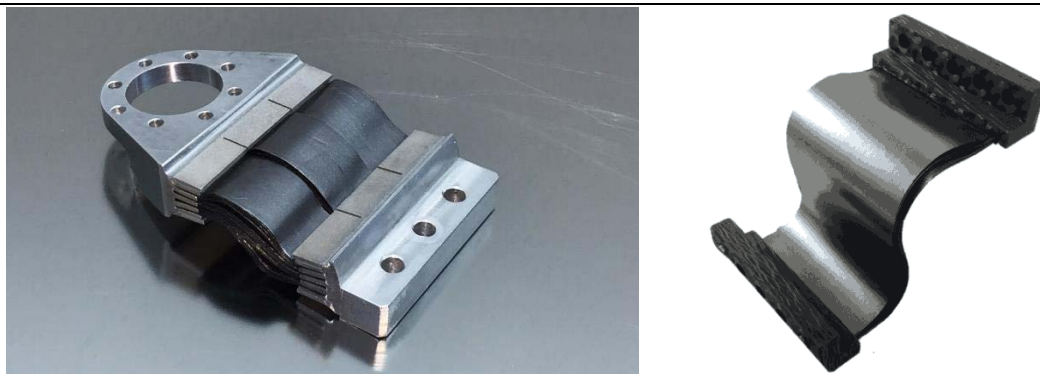


图 13 复合柔性石墨冷链（左图）和一体式柔性石墨冷链（右图）

Fig.13 Compound graphite flexible thermal link (left) and integrated graphite flexible thermal link (right)

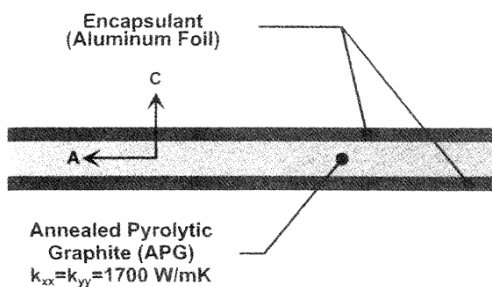


图 14 热解石墨柔性冷链结构

Fig.14 Flexible thermal link structure of APG

美国的 Akira Yao 提出对碳纤维纸柔性冷链结构减小温度梯度的解决方法，如图 15 所示。可通过在冷链热接口两端，在碳纤维纸之间夹入金属薄片来均匀由于碳纤维纸各向异性热导率带来的温度梯度<sup>[10]</sup>。

## 2.2 柔性冷链的国内研究现状

随着我国在空间领域的不断发展，对各种空间应用探测器的要求与性能不断提升，由于柔性冷链在隔绝机械制冷机带来的振动和灵活传输以及分配冷量方面具有很好的效果，我国的研究人员也对柔性冷链

进行了研究。

国内主要以紫铜丝导热带或多片铜薄片组来制成柔性冷链。2007年,中国科学院理化研究所采用3000根直径为0.01 cm紫铜丝绞在一起的紫铜丝导热带制作成柔性导热带用于整机结构中<sup>[11]</sup>;2013年,兰州空间技术物理研究所的孙泽采用了30片0.2 mm厚度长100 mm紫铜箔弯曲成双臂状制作成柔性导热用于高温超导滤波器的降温<sup>[12]</sup>;中国上海技物所在多个项目中使用紫铜薄片组成的柔性冷链为其提供冷链传输,主要应用在同一制冷源为多种组件提供制冷,多台制冷机为一个组件提供制冷和超长线列红外探测器等应用上,以2015年该所的范广宇提出的一种弹性冷链的设计方案为例,为满足超长线列红外探测器杜瓦组件的需求,该冷链设计为采用多片厚0.25 mm,弯曲成S形,沿水平方向切割成四等分的铜薄片来作为柔性结构,通过对热接口位置及各连接处不同的厚度进行模拟计算,使各个分枝的热阻相同,来满足杜瓦冷平台温度均匀性要求,该冷链最终实测结果为其冷平台在液氮温度下最大温差为1.6 K,冷链上下两端导热温差为6.2 K<sup>[2]</sup>,该冷链结构如图16所示。

### 3 冷链性能测试

柔性冷链的性能主要是集中在力学和热学方面,

可细分别为以下几个性能指标:

- 1) 柔性冷链整体本身的热导率或热阻;
- 2) 柔性冷链的各个方向的刚度;
- 3) 柔性冷链的隔振效果;
- 4) 柔性冷链的疲劳特性。

国外能够对冷链的热阻、刚度、隔振效果和疲劳特性进行测量,给出柔性冷链完整的指标性能。如图17所示为柔性冷链热学性能测试平台,将冷链处于真空环境中来减小对流漏热的影响,通过防辐射屏或包裹镀铝聚酰亚胺薄膜来减小辐射漏热的影响,使用热电阻或者加热片来模拟热耗确定热流,液氮或者制冷机进行制冷,温度传感器测量冷链上下两端的温度,便可计算出冷链整体的热导率或热阻<sup>[13]</sup>。

如图17所示,通过测量冷链各个方向的应变随应力的变化关系可测得冷链各个方向的刚度<sup>[8]</sup>;在振动台或振动源上,通过振动加速度传感器测量冷链两端的振动,可计算出冷链的隔振性能<sup>[14]</sup>;通过在冷链上加加载相应正弦周期变化的力,可测得冷链的疲劳性能。

国内也对冷链的测量进行相关的研究工作,主要通过将冷链装载在应用部件内对冷链的部分热学性能进行了测量<sup>[15]</sup>,如冷链上下两端的温差等热学性能参数,但很少对冷链的力学性能如刚度、隔振和疲劳特性等参数进行测量。

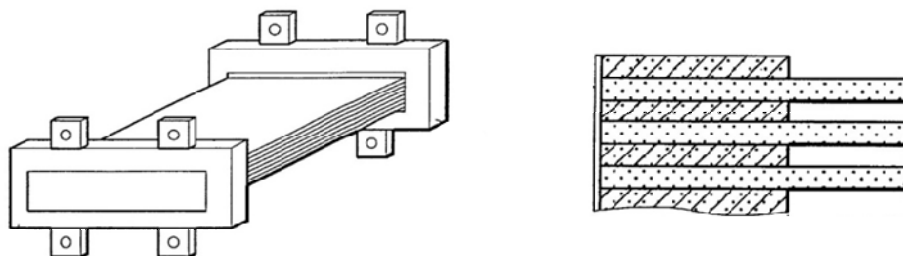


图15 碳纤维纸柔性冷链结构(左图)和冷链夹层结构(右图)

Fig.15 Flexible thermal link structure of carbon fiber paper (left) and sandwich structure of thermal link (right)

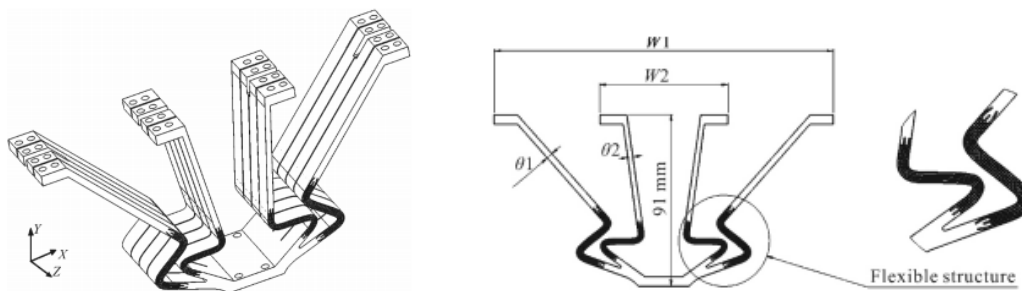


图16 直线脉管集成耦合杜瓦柔性冷链结构

Fig.16 Flexible thermal link structure of linear pulse tube cooler dewar assembly



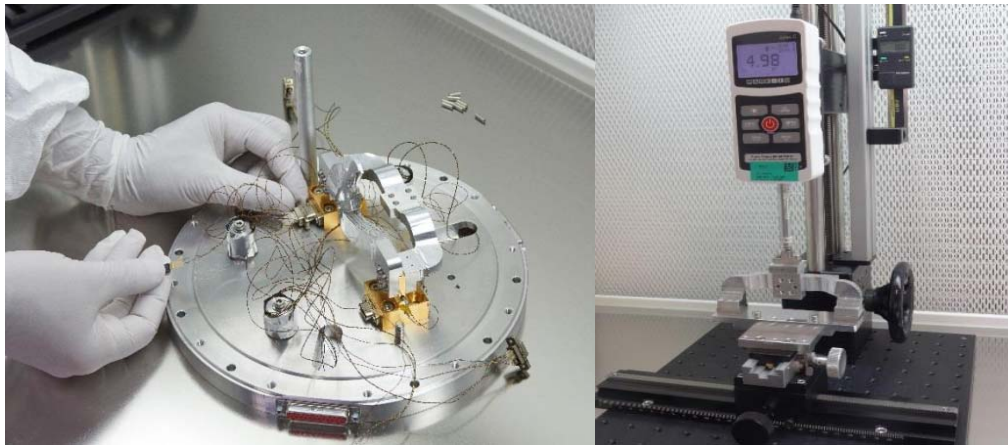


图17 冷链热学性能测试平台(左图)和冷链刚度测试平台(右图)

Fig.17 Thermal performance test platform of thermal link(left) and stiffness test platform of thermal link(right)

## 4 应用及展望

随着三代红外焦平面探测器组件更大面阵、双多色的发展,和我国航天事业的飞速发展,大面阵、长线列红外探测器和拼接式红外探测器将大量应用于航天领域,新型的探测器杜瓦与制冷机的耦合方式将逐渐普及,本文提及的各种柔性冷链的设计、制作和测试也将会逐渐完善,在未来超长线列红外探测器与制冷机之间的耦合技术中将全方面发展。

### 参考文献:

- [1] 东海杰,张磊,白绍竣,等.长线列红外探测器组件冷台面结构设计[J].*激光与红外*,2018,48(8):1020-1022.  
DONG Haijie, ZHANG Lei, BAI Shaojun, et al. Structure design of the cold table for long linear infrared detector assembly[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(8): 1020-1022.
- [2] 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):2021-2016.  
FAN Guangyu, FAN Cui, LI Jun, et al. Cold strap design of long linear IRFPA dewar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2021-2016.
- [3] Dolce S, Hauser A. Analysis, design and testing of a flexible thermal link[J]. *Space Environmental Control Systems*, 1997: 337-340.
- [4] Amundsen M E. SAE Technical Paper Series - Thermal Design and Analysis for the Cryogenic MIDAS Experiment[C]//*SAE International Conference On Environmental Systems*, 1997: 1.
- [5] LI J, Schmit T J. Advanced baseline sounder (ABS) for future geostationary operational environmental satellites (GOES-R and beyond)[C]//*Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2003, 4895: 111-122.
- [6] Morse P G, Bates J C, Miller C R, et al. Development and test of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) for the NASA Earth Observing System (EOS)[C]//*Sensors, Systems, & Next-generation Satellites III. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites III*, 1999: 281-292.
- [7] Sugimoto M, Sekimoto Y, Yokogawa S, et al. Thermal link for cartridge-type cryostat[J]. *Cryogenics*, 2003, 43(8): 435-439.
- [8] Trollier T, Tanchon J, Lacapere J, et al. Flexible Thermal Link Assembly Solutions for Space Applications[J]. *Cryocoolers*, 2016, 19: 595-603.
- [9] Montesano M. High performance flexible thermal strap[C]//*39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2001: 218.
- [10] Yao A. Interface portion structure and reinforcing structure of flexible thermal joint: U.S. Patent 5,769,158[P]. 1998-6-23.
- [11] 闫涛,洪国同,蔡京辉,等.一种应用于低温系统的柔性冷量传输带[C]//*全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网学术交流会*, 2007: 299-303.  
YAN Tao, HONG Guotong, CAI Jinghui, et al. A flexible thermal strap applied to cryogenic system[C]//*National Cryogenic Engineering Conference and Academic Meeting of China Aerospace Cryogenic Information Network*, 2007: 299-303.
- [12] 孙述泽,许国太,王田刚,等.一种双臂型低温导热带的性能研究[J].*低温与超导*, 2013, 41(5):10-12.  
SUN Shuze, XU Guotai, WANG Tiangang, et al. Study on performance of cryogenic two-arm flexible thermal strap[J]. *Cryogenics*, 2013, 41(5): 10-12.
- [13] Urquiza E, Vasquez C, Rodriguez J, et al. Development and testing of an innovative two-arm focal-plane thermal strap(TAFTS)[J]. *Cryogenics*, 2012, 52(4-6): 0-3.
- [14] Williams B, Jensen S, Batty J C. An Advanced Solderless Flexible Thermal Link[C]//*Proc of SPIE*, 1996, 2814: 209-216.
- [15] 王亚妮,张巍,迟国春,等.制冷机与红外探测器冷链耦合技术研究[J].*激光与红外*, 2018, 48(2): 148-152.  
WANG Yani, ZHANG Wei, CHI Guochun, et al. Research of cold chain linking technology between cryocooler and infrared detector[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(2): 148-152.