

低温光学用杜瓦柔性外壳结构热力特性研究

陈俊林^{1,2}, 王小坤^{1,2*}, 曾智江^{1,2*}, 朱海勇^{1,2}, 季鹏^{1,2}, 王翰哲², 胡兴健²

1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 为了满足低温光学系统低背景、低功耗和红外探测器制冷组件高环境适应性的要求,提出了探测器制冷组件杜瓦主体(窗口、窗口帽和引线盘) 200 K 低温保持,与制冷机膨胀机或脉管散热面柔性绝热连接的设计思想。针对低温光学用杜瓦柔性外壳工程应用中的特点,文中以某低温光学用长波 12.5 μm 2 000 元红外探测器杜瓦组件为例,提出了波纹管作为绝热连接的柔性外壳,重点阐述杜瓦柔性波纹管隔热、力学和相关漏热的设计,并开展不同热负载条件下波纹管热特性验证,可实现最小温度梯度为 37.22 K,绝热热阻为 1 142 K/W,误差在 37%。为综合评价低温光学用柔性外壳结构杜瓦组件的性能,对某低温光学用长波 12.5 μm 2 000 元探测器柔性外壳杜瓦组件开展热真空和鉴定级的力学试验考核验证,试验结果表明实现了 200 K 低温窗口,探测器 60 K 工作,杜瓦漏热为 544 mW,低温工况工作时相对于常温工况制冷机的功耗下降了 53%,并通过了 4 g 的随机力学考核,验证了低温光学用杜瓦柔性波纹管外壳模型合理可行,对于后续低温光学用杜瓦柔性外壳结构工程应用提供了重要参考。

关键词: 波纹管; 杜瓦; 低温光学; 低温隔热; 热特性

中图分类号: TK123 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220180

Study on thermal characteristics of Dewar flexible shell structure for cryogenic optics

Chen Junlin^{1,2}, Wang Xiaokun^{1,2*}, Zeng Zhijiang^{1,2*}, Zhu Haiyong^{1,2}, Ji Peng^{1,2}, Wang Hanzhe², Hu Xingjian²

1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In order to meet the requirements of low background, low power consumption of low temperature optical system and high environmental adaptability of infrared detector refrigeration components, the design idea of the Dewar main body (window, window cap and enclosure) maintaining low temperature and flexible adiabatic connection with the cooling surface of the cryocooler expander is proposed. Aiming at the characteristics of the engineering application of the Dewar flexible shell for cryogenic optics, this paper takes a Dewar component of a long-wavelength 12.5 μm 2 000 element infrared detector for cryogenic optics as an example. This paper proposes a bellows as a flexible shell for adiabatic connection. The design of thermal insulation, mechanics and associated

收稿日期:2022-03-14; 修订日期:2022-05-20

基金项目:地球大数据科学工程(XDA19010102); 国家重点研发计划(2016 YFB0500400)

作者简介:陈俊林,男,助理研究员,硕士,主要从事红外焦平面探测器低温封装集成技术方面的研究。

通讯作者:王小坤,男,正高级工程师,硕士生导师,硕士,主要从事红外焦平面探测器低温封装集成技术方面的研究。

曾智江,男,高级工程师,硕士生导师,硕士,主要从事红外焦平面探测器低温封装集成技术方面的研究。

heat leakage of Dewar flexible bellows is highlighted. The thermal characteristics of bellows under different thermal load conditions are verified, and the minimum temperature gradient is 37.22 K, the adiabatic thermal resistance is 1142 K/W, and the error is 37%. In order to comprehensively evaluate the performance of the flexible shell structure, the thermal vacuum and qualification-level mechanical tests are carried out for a long-wavelength 12.5 μm 2 000 element detector flexible shell Dewar component for cryogenic optics. The test results show that when the low temperature window works at 200 K, the detector works at 60 K, the heat leakage of the Dewar is 544 mW. Compared with the normal temperature condition, the power consumption of the cryocooler is reduced by 53% when working in low temperature condition, and the 4 g random mechanical test is passed, which verifies the low temperature optics. It is reasonable and feasible to use the Dewar flexible bellows shell model, which provides an important reference for the subsequent structural engineering application of the Dewar flexible shell for cryogenic optics.

Key words: bellows; Dewar; cryogenic optics; heat insulation; thermal properties

0 引言

为了更好地满足空间弱目标的红外探测需求,高灵敏度、低噪声是必然的发展趋势,而冷光学技术是实现这一目标的有效手段之一。光学系统工作在低温后,也会带来一系列的问题,主要包括:光机结构的低温形变,光学元件特性的变化,低温光校、测试难度增大,低温污染的控制,制冷机功耗散热等。其中,高热阻隔热技术、冷量传输技术、光机低温集成等技术是低温光学系统的关键技术。

低温光学对于抑制红外背景噪声有着显著的作用。国内外报道集中于低温冷箱与杜瓦耦合中波纹管作为光学校正手段,钛合金和聚酰亚胺作为杜瓦与制冷机隔热手段^[1],集成于窗口帽和柱壳之间的柔性波纹管用作低温光学用杜瓦外壳结构未见文献报道。常见的低温光学系统一般采用无杜瓦窗口设计与低温光学耦合安装,这样可以减少杜瓦窗口对于红外探测器的背景噪声,但是在整机安装时,无杜瓦窗口设计通常会引入杜瓦与低温光学安装时的污染、系统联试对探测器组件的分级评价、系统安全性和可维修性问题,因此杜瓦窗口、窗口帽作为冷光学系统仪器背景的一部分,随着工作温度的降低,仪器背景辐射在像面上的照度不断降低,当工作温度小于 220 K 时,温度变化对仪器背景辐射变化影响微弱^[2]。鉴于防污染、低仪器背景的需求,杜瓦窗口帽温度控制在 200 K 是一个好的选择^[3]。杜瓦主体(窗口、窗口帽和引线盘)制冷是低温光学用探测器制冷组件与低温光学系统采用不共用真空腔设计,为降低窗口的背景

辐射和窗口结构支撑窗口帽对探测器冷平台的辐射热,从而对杜瓦主体制冷。杜瓦主体制冷冷量来自低温光学的冷量,此类探测器组件内在冷平台上仍安装了低温滤光片。低温滤光片的目的是对探测器响应的光谱范围进行限制,滤光片制冷的冷量是由制冷机的冷量通过杜瓦冷平台传输给滤光片。

当探测器制冷杜瓦组件处于 200 K 左右时,带来如下问题:(1)传统的杜瓦与制冷机采用刚性连接,窗口帽的冷量传递到制冷机的脉管散热面或膨胀机散热面(如图 1 所示),在增加制冷机热负载的同时,制冷机的材料、设计和工艺面临严峻的技术挑战;(2)制冷机的脉管或膨胀机为发热源,制冷机工作时所产生

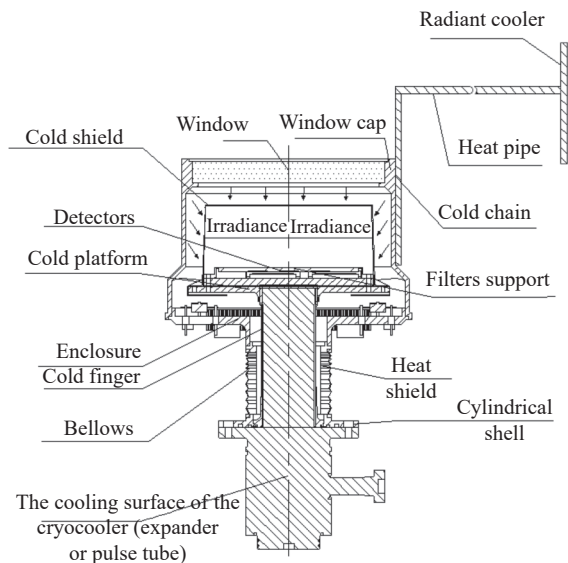


图 1 杜瓦结构及辐照度示意图

Fig.1 Schematic diagram of Dewar structure and irradiance

的热量会传递给杜瓦窗口帽和窗口,从而增加仪器背景和辐射;(3)传统的杜瓦与制冷机采用刚性连接,制冷机和杜瓦都需要固定支撑,会带来过定位的问题。综上所述,杜瓦窗口帽与制冷机的柔性隔热尤其重要。文中提出了制冷组件杜瓦主体保持低温,与制冷机膨胀机或脉管散热面柔性绝热连接的设计思想。针对低温光学用杜瓦柔性外壳的特点,提出了波纹管作为绝热连接的柔性外壳,并对波纹管的设计思路、设计方法进行了研究,通过试验对设计方法的有效性进行了验证。

1 设计原理

针对低温光学用杜瓦组件的应用场合,分析制冷机的脉管或膨胀机与低温光学用杜瓦组件的热链路,脉管或膨胀机与杜瓦窗口帽和窗口之间的热量交换仅为固体传导。需要热路径上增加热阻,以便让热流尽可能的减小或者限定在规定范围内,从而实现制冷机脉管或膨胀机与杜瓦窗口帽和窗口之间的热隔离要求,常用的低温绝热一般采用低热导率的绝热材料或特殊设计的低温绝热结构来实现^[4]。在低温光学系统应用中,光机结构由于低温下材料膨胀系数差异导致结构发生变形,从而影响光校、光路对准、低温定标等。红外探测器制冷组件通常将主支撑面设置在脉管或膨胀机散热面上,杜瓦窗口帽接近窗口处多设置为辅助支撑面,其同时为探测器制冷组件的光校基准。由于低温下膨胀系数差异,常温光学基准会偏离原有的基准,卫星光机结构与杜瓦、制冷机的连接在低温下也会发生偏离;另一方面,卫星光机结构在进行相关的力学环境试验(尤其是随机振动)考核中,受输入量级激励后杜瓦窗口帽处输出量级会有所放大,火箭发射过程中也会遇到类似的情况,其低温光机结构会受到安装应力、低温应力的影响。

柔性隔热外壳研究是解决上述问题的很好途径。文中以低温光学用长波 12.5 μm 2 000 元红外探测器杜瓦组件为例,从杜瓦的模型看(图 1 所示),柔性外壳可安装在柱壳和杜瓦窗口帽之间(近柱壳端),也可以安装在窗口和引线盘之间(近窗口端),在杜瓦封装结构中,窗口帽相对于冷端探测器是一个杂散辐射源。如图 2 所示,对红外焦平面探测器在窗口帽

300~200 K 的不同波段下杂散光辐照度进行分析,以 11.5~12.5 μm 通道为例,200 K 下窗口帽的对探测器的杂散辐射照度为 0.000 66 W/m^2 ,相较于 300 K 的 0.006 98 W/m^2 ,其对探测器的杂散光强度下降了一个数量级^[5]。基于降低杂散辐射照度的考虑,需要将窗口和窗口帽同时降温到 200 K 左右,因此将柔性外壳结构安装到杜瓦窗口帽和柱壳之间。

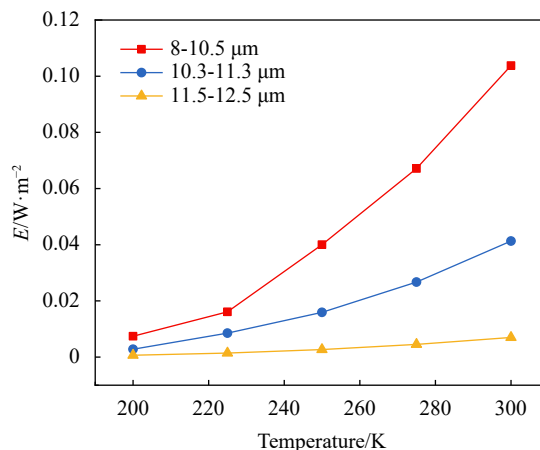


图 2 窗口帽 300 K 和 200 K 的对探测器的杂散光辐照度

Fig.2 Detector irradiance from stray light from the window cap at 300 K and 200 K

基于隔热、低温应力、防过定位以及冷光学的考虑,文中提出了安装在杜瓦窗口帽和柱壳之间柔性外壳结构。考虑到波纹管具备良好的柔韧性以及长传热路径的优点,同时兼容封装工艺可行性,选用不锈钢波纹管作为柔性外壳结构。波纹管为 V 型结构,其单层结构为薄壁零件以减少传递链路截面积,并增加传递链路,降低漏热,增加隔热效果。将柔性波纹管结构安装在低温窗口帽和柱壳之间,以减少低温应力和过定位安装带来的光学失准的影响。

2 低温光学用杜瓦柔性波纹管设计及低温杜瓦漏热

2.1 波纹管隔热设计

为实现相机红外载荷低温光学系统在轨低温工作温度,如图 1 所示,在杜瓦窗口帽上安装冷链并与热管连接,热管与辐冷板连接,以实现杜瓦主体 200 K 低温工作,分置式制冷机与杜瓦耦合,制冷机膨胀机或脉管与杜瓦柱壳法兰面螺栓安装固定,而根据

国军标的要求, 制冷机脉管散热面或膨胀机散热面的温度要求不低于 218 K, 同时考虑低温光学杜瓦力

学可靠性等方面的要求^[6], 波纹管的设计指标如表 1 所示。

表 1 设计指标

Tab.1 Design requirements

Items	Design requirements (Dewar heat load 1 W@55 K@195 K)
Temperature difference between vessel and window cap	≥18 K
Thermal resistance of bellows (77 K)	800 K/W
Random vibration condition	20-100 +3 dB/oct
	100-600 0.01946 g ² /Hz
	600-2 000 -9 dB/oct

隔热材料的导热系数不大于 0.14 W/(m·K), 能够阻止热流传递。但此类材料的气密焊接工艺可行性不高^[7]。文中的杜瓦窗口帽、引线盘材料选用可伐合金, 考虑工艺可焊性, 选择不锈钢 316L 作为波纹管外

壳的材料, 波纹管采用焊接成型技术, V 型波纹管每层壁厚 0.1 mm, 具体参数如表 2 所示, 不锈钢波纹管 and 引线盘、柱壳之间通过圆周激光焊成型, 波纹管模型如图 3 所示。

表 2 波纹管设计参数

Tab.2 Design parameters of bellows

Items	Design parameters	Items	Design parameters
Wall thickness/mm	0.1	Inside	Vacuum
Material/L	316	Outside	Atmosphere
Wave pitch/mm	0.85	Stroke/mm	4
Wave number	26	Shaft	∅30
Leak rate (He)/Torr·s ⁻¹	<1E-10	Setting direction	Vertical
Size	0.D.46×I.D.33	Shape	V

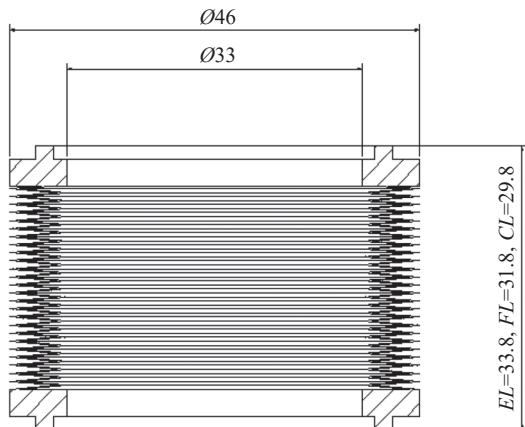


图 3 波纹管尺寸示意图

Fig.3 Schematic diagram of bellows size

文中采用导热热阻来表征波纹管的隔热效果, 由于波纹管为轴对称结构, 通过波数、波距等参数获得

热传输链路上有效距离增加, 来实现隔离原理。可将波纹管热传导模型简化为轴对称的圆筒薄壁零件热传导, L 为热传输的有效长度, 其根据波数、波距等参数确定, A_c 为等效截面积, 可根据壁厚和直径确定, λ 为材料的热导率, 取其平均值。波纹管的导热热阻 R_c 可以通过公式 (1) 计算^[8], 通过对某长波 2 000×12 元杜瓦柔性波纹管的热阻计算, 其热阻为 1831 K/W(77 K)。

$$R_c = \frac{L}{A_c \times \lambda \times \delta} \quad (1)$$

式中: L 为波纹管两端冷量传递方向的长度; A_c 为波纹管等效截面积; λ 为材料的热导率; δ 为波纹管接触面积修正系数, 取值 0.95。

2.2 低温光学用杜瓦柔性外壳的力学设计

波纹管在压力、轴向力、横向力或弯矩作用下产

生位移,其作用力及位移的比值为刚度 K 。 K 值越大,柔性越差,波纹管安装过程中可能会产生失稳,而 K 值越小,柔性越好,其产生的位移补偿越好。波纹管的刚度一般有轴向刚度、旋转刚度和弯曲刚度,其计算的方法有能量法, EJMA 标准计算法,经验公式法等^[9]。波纹管在不同过程的刚度类型受工装影响较大,但其自身刚度特性主要取决于其几何尺寸,尤其是壁厚,对于内径 $\Phi 10\sim\Phi 100$ mm 的波纹管,壁厚与内径的比值一般控制在 0.0006~0.05 之间,对于文中的波纹管,壁厚与内径比值为 0.003,轴向最大位移量为 ± 2 mm,相对于整机要求,已有足够的柔性。杜瓦封装过程中,用专用工装控制波纹管将杜瓦引线盘与柱壳之间实现刚性互联,并将探测器中心引入到窗口帽上,杜瓦封装全过程中工装不拆除,与制冷机、底板

安装时,将其基准引入到光机工装上,然后拆除封装用专用工装,以此实现探测器基准的传递。

建立柔性外壳的杜瓦模型及尺寸如图 4 所示,将波纹管及其它杜瓦零部件建模简化后导入有限元分析软件,模型中各部件的材料参数如表 3 所示^[6]。

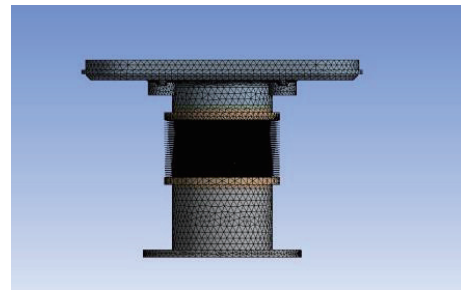


图 4 试验杜瓦力学有限元模型

Fig.4 Mechanics FEM model of test Dewar

表 3 模型各部分材料及其特性

Tab.3 Materials and properties of each part of the model

Name	Material	Density/kg·m ⁻³	Elastic modulus/GPa	Specific heat capacity/J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Cylindrical shell	304 L	8050	200	409
Bellows	316 L	8050	200	409
Enclosure	Kavar	8360	142	352

与波纹管相比,杜瓦引线盘及柱壳具有足够的刚度,在相机力学支撑中,杜瓦引线盘及柱壳作为主支撑面,因此在建立力学有限元分析模型中,将引线盘和柱壳作为固定边界,力学分析结果如表 4 所示,由于波纹管为薄壁零件,波纹管最先起振,根据仿真结果各阶次所对应振型可以看出 1~3 阶振动为波纹管本身的振动,振动频率为 450.5 Hz,至 4 阶振动才是引线盘本身的振动,且频率较高,整机及相机整星力学试验的基频基本小于 100 Hz,波纹管不会受到额外的影响^[10]。

表 4 模态分析结果

Tab.4 Result of modal analysis

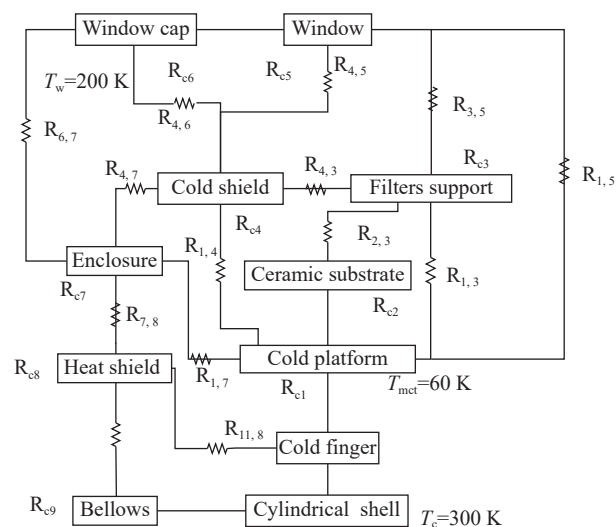
Mode	Frequency/Hz
1	450.5
2	469.13
3	562.14
4	1381.4
5	1398.8

2.3 低温光学用杜瓦组件的漏热

制冷机的脉管或膨胀机为发热源,制冷机工作时,脉管或膨胀机的热量会传递到低温光学杜瓦组件的窗口帽和窗口,这样会引起窗口帽和窗口对冷屏、滤光片支架的辐射热增加,从而导致杜瓦漏热的增加。而杜瓦漏热的增加,制冷机需要进一步增大功耗以提高降温效果,保持探测器工作所需的温度,制冷机功耗增加又会引起脉管或膨胀机的热量增加,从而陷入功耗增加到漏热增加的死循环。故需要对柔性外壳结构的低温光学用杜瓦的漏热进行进一步的分析设计。

漏热由四部分组成:热传导漏热、辐射漏热、探测器焦耳漏热和对流漏热。将各部份等效为包含自身热参数温度和热容的单个节点。对流漏热由杜瓦的真空度决定的,杜瓦工作时其内部真空度一般也小于 1×10^{-4} Pa,对流漏热非常小,可以忽略不计。根据实际传热路径,采用等效热网络法建立其热分析模型^[11]。基于柔性波纹管的低温光学用杜瓦组件的热网络分

析模型如图 5 所示, 仅讨论热传导漏热和辐射漏热两部分内容。



Tips: R_c, Thermal resistance; R_r, Radiant thermal resistance

图 5 热网络模型示意图

Fig.5 The figure of thermal network model

(1) 热传导漏热^[12]

热传导漏热包括杜瓦芯柱热传导漏热、引线热传导漏热。由于杜瓦芯柱和引线的截面都非常小, 而且同为轴对称结构, 可将其导热简化为一维稳态热传导模型, 一维稳态热传导公式为:

$$Q_c = \kappa \frac{A}{\sigma} \Delta T \tag{2}$$

式中: κ 为材料在 ΔT 温度范围内的平均热导率; A 为热传导面积; σ 为热传导的长度; ΔT 为材料两端的温度差。

(2) 辐射漏热^[12]

辐射漏热是杜瓦寄生热负载的重要组成部分之一, 由于该杜瓦结构比较特殊, 芯柱为杜瓦冷头的主支撑体, 和制冷机冷指间隙配合, 柱壳与制冷机脉管法兰盘通过螺栓刚性连接, 柱壳上端为波纹管, 波纹管的另外一端为与杜瓦主体连接。芯柱、柱壳、冷头、冷屏、滤光片支架和窗口帽等可以简单地看成同轴的结构, 且冷屏已经将冷平台的大部分遮住, 为阻止视场外的红外杂散光而在光路中设置的低温冷阑, 同时冷屏外表面镜面抛光并镀金, 以降低表面发射率, 因此辐射漏热主要包括: 柱壳内壁对芯柱的辐射、窗口帽内壁对冷屏侧面的辐射、窗口和窗口帽内壁冷屏和滤光片支架上表面的辐射三部分。

任意两个表面之间的辐射热流可以表示为:

$$Q_{ij} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \tag{3}$$

式中: E_b 为与表面同温度的黑体的发射功率, 而且满足 $E_b = \chi T^4$, 其中 χ 为波尔兹曼常数 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T 为绝对温度; ϵ 为发射系数; A 为表面的面积; F_{12} 为表面 $A_1 \sim A_2$ 的视觉系数。

综上所述, 下面对杜瓦制冷机组件在不同工况下的杜瓦寄生热负载进行归纳如表 5 所示。

表 5 杜瓦的寄生热负载

Tab.5 Thermal loads of Dewar

Cryocooler working condition	Temperature of detector/K	Solid heat leakage/mW	Radiant heat leakage/mW	Thermal loads of Dewar/mW
Normal temperature condition (pulse tube @23 °C)	60	673	1000	1673
High temperature conditions (pulse 263 K, window cap 228 K)	60	456	306	762
	55	471	305	776
Low temperature conditions (pulse 228 K, window cap 193 K)	60	375	169	544
	55	387	170	557
	50	404	171	575

3 测试及试验结果

3.1 波纹管的热阻测定

如图 6 所示, 将波纹管胶接在测试杜瓦内的冷平台上, 在波纹管的上下两端贴装二极管以测定温度梯

度, 并在波纹管的上端面贴装加热电阻, 并通过合适的低漏热引线引出到测试杜瓦外端, 在波纹管的外表面贴装高反射率的多层镀铝聚酯薄膜以降低测试杜瓦窗口帽对波纹管的辐射漏热。整个测试杜瓦内部维持一定的高真空, 通过在波纹管上端面的加热电阻

施加不同电流以模拟不同负载条件下的温度梯度,进而估算出波纹管的热阻,通过控制冷平台温度为 (77 ± 3) K 温度重复三次试验对比,并对热阻结果取平均值后统计如表 6 所示,结果表明,波纹管顶端加热功率在 101 mW 时,计算得到的热阻与实测热阻最大误差为 37%,引起误差的最主要原因是波纹管内部传输一定热流,在波纹管两端产生一定的温度梯度。其热阻是通过热阻随温度变化的函数,在起始温度和终止温度范围积分后获得,而计算时采用恒定热阻,根据公式 (1) 可知,在波纹管参数一定的前提下,热阻与材料的热导率 λ 倒数相关,理论计算时根据 300 K 温度范围内的平均热导率,结合温度范围简单差分获得,从而导致理论计算数值差别较大。测试装置本身的热阻主要来自多次装配的接触热阻和辐射热带来

的热阻^[13],由于试验时控制界面状态和多层包扎的质量,测试装置本身有热阻,但不是主因。

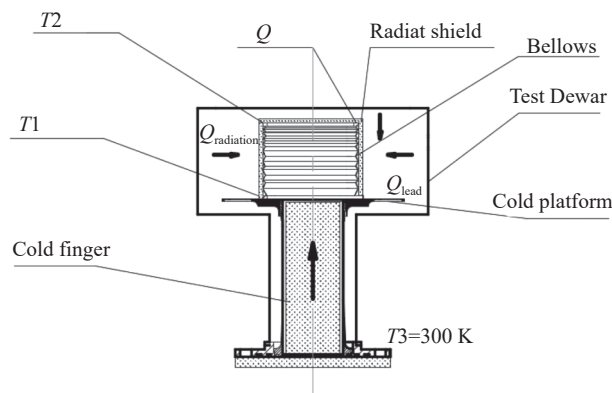


图 6 波纹管漏热测定示意图

Fig.6 Schematic diagram of heat leakage measurement of bellows

表 6 波纹管的热阻测定

Tab.6 Determination of thermal resistance of bellows

Q/W	$T1/K$	$T2/K$	$\Delta T/K$	Thermal resistance/ $K \cdot W^{-1}$	Theoretical thermal resistance/ $K \cdot W^{-1}$	Deviation
0	74.45	153.5	79.05			
0.101	77.6	193	115.4	1142.574	1831	37%

3.2 制冷探测器杜瓦组件热真空试验

采用柔性波纹管外壳结构的杜瓦与制冷机耦合之后形成制冷探测器杜瓦组件,制冷探测器杜瓦组件在低温条件下,柔性波纹管的实际使用需要进一步验证。探测器组件热真空试验如图 7 所示。组件热量通过冷板、热管将热量带走。制冷机冷指热量通过热管散至组件旁辐射冷板上。在辐射冷板以及制冷机支架上布置补偿加热回路以及测温点,用于组件的控温^[14]。另外真空罐内有加热笼,可调节外热流,用于组件温度的调节。

试验结果表明:制冷探测器杜瓦组件低温试验过程中,在高温工况(脉管 263 K,窗口帽 228 K)工作时,探测器控温为 60 K,此时制冷机功耗初期为 52.08 Wac,探测器上电后,后期稳定约为 69.06 Wac,冷头的热负载施加了 600 mW 左右的焦耳热,制冷机相同工况下增加了 16.98 Wac 功耗,其波纹管冷端和热端的温度梯度范围为 37.22~39.11 K。后续探测器控温在 55 K 时,此时制冷机功耗初期为 61.6 Wac,探测器上电后,后期稳定约为 89.1 Wac,冷头的热负载

施加了 600 mW 左右的焦耳热,制冷机相同工况下增加了 27.5 Wac 功耗,其波纹管冷端和热端的温度梯度范围为 39.59~40.93 K。

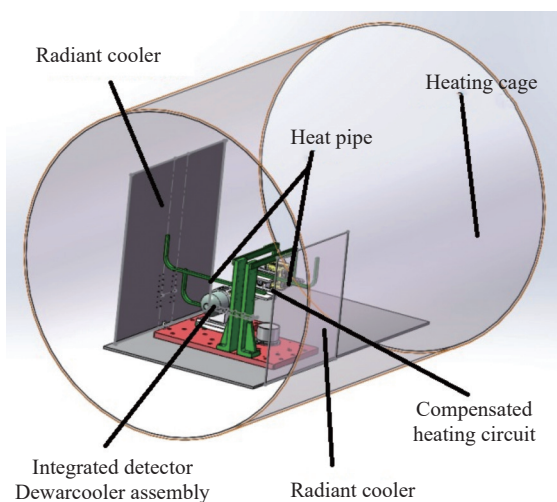


图 7 制冷探测器杜瓦组件低温试验示意图

Fig.7 Schematic diagram of low temperature test of integrated detector Dewar cooler assembly

在低温工况 (脉管 228 K, 窗口帽 193 K) 工作时, 探测器控温 60 K 时, 此时制冷机功耗初期为 46.84 Wac, 探测器上电后, 后期稳定约为 60.77 Wac, 冷头的热负载施加了 600 mW 左右的焦耳热, 制冷机相同工况下增加了 13.93 Wac 功耗, 其波纹管冷端和热端的温度梯度范围为 37.64~46.17 K。对比常温工况时, 杜瓦漏热估算 1673 mW, 在低温工况工作时, 杜瓦漏热仅为 544 mW, 仅为常温工况杜瓦漏热的 32%。低温工况下探测器上电的功耗为 60.77 Wac, 相对于高温工况下 69.06 Wac@60 K 有所减小, 但减小量不大。同样, 低温工况下探测器不上电的制冷机功耗 46.84 Wac 相对于高温工况下 52.08 Wac@60 K 均有所减小, 但减小量不大, 由此可判断制冷机不同工况 (263 K 和 228 K)、窗口帽不同温度 (228 K 和 193 K) 下制冷机热负载变化不大; 探测器控温在 55 K 时, 此时制冷机功耗初期 56.52 Wac, 探测器上电后, 后期稳定约为 72.74 Wac, 冷头的热负载施加了 600 mW 左右的焦耳热, 制冷机相同工况下增加了 16.22 Wac 功耗, 其波纹管冷端和热端的温度梯度范围为 48.06~48.91 K, 基本变化不大; 后续探测器控温在 50 K 时, 此时制冷机功耗初期 65.72 Wac, 探测器上电后, 后期稳定约为 94.94 Wac, 冷头的热负载施加了 600 mW 左右的焦耳热, 制冷机相同工况下增加了 29.22 Wac 功耗, 其波纹

管冷端和热端的温度梯度范围为 46.63~48.28 K, 基本变化不大。

综上, 通过对波纹管热端和冷端温度的监测, 波纹管在制冷机不同工况下的温度梯度最小为 37.22 K, 随着窗口帽温度的降低, 当达到热平衡状态时, 波纹管的温度梯度逐渐增大, 最大可为 48.96 K。另外, 根据表 7 热真空试验中实测的各温度点可以表征出杜瓦的温度场, 以此作为输入条件代入低温光学用杜瓦组件的漏热的设计模型 (图 5), 可以计算出不同工况下杜瓦的热负载。制冷机提供的冷量 (即杜瓦冷端的总负载) 用于抵消探测器焦耳热和杜瓦的热负载。对表 7 中所列探测器温度、杜瓦冷端的总负载和制冷机输入功耗等图形化汇总后形成如图 8 所示, 当窗口帽为 200 K 和探测器工作为 50 K 时, 探测器未上电时, 制冷机的制冷能力为 65.72 Wac@575 mW, 当探测器上电后, 探测器的焦耳热施加到杜瓦冷头上, 并反馈到制冷机上, 制冷机需要进一步增大功耗以提高降温效果, 保持探测器工作所需的温度, 制冷机功耗增加又会引起脉管或膨胀机的热量增加, 与探测器未上电时比较, 窗口帽、波纹管冷端、波纹管热端的温度基本无变化, 可以认为制冷机的功耗的增加基本为探测器功耗增加引起的, 低温光学用杜瓦组件的柔性波纹管的隔热性在工程中得到进一步验证。

表 7 制冷探测器杜瓦组件低温试验数据

Tab.7 Low temperature test data of integrated detector dewarcoller assembly

Cryocooler working condition	Temperature of detector/K	Dewar leakage heat/mW	Detector power consumption /mW	Total load/mW	Temperature of window cap/K	Temperature of Hot end bellows/K	Temperature of Cold end bellows/K	Cooler power consumption/ Wac	Insulation effect of bellows/K
Normal temperature condition (Pulse tube @296 K)	60	1673	0	1673	296	296	296	99	
	60	762	0	762	229.84	267.71	230.49	52.08	37.22
High temperature conditions (pulse 263 K, window cap 228 K)	60	762	600	1362	225.5	265.81	226.7	69.06	39.11
	55	776	600	1376	223.21	263.94	224.35	89.1	39.59
	55	776	0	776	221.88	263.4	222.47	61.6	40.93
	60	544	0	544	214.56	253.16	215.52	46.84	37.64
Low temperature conditions (pulse 228 K, window cap 193 K)	60	544	600	1144	194.08	241.87	195.7	60.77	46.17
	55	557	600	1157	193.27	243.52	194.61	72.74	48.91
	55	557	0	557	192.83	242.31	194.25	56.52	48.06
	50	575	0	575	192.43	241.04	194.41	65.72	46.63
	50	575	600	1175	192.1	241.48	193.2	94.94	48.28

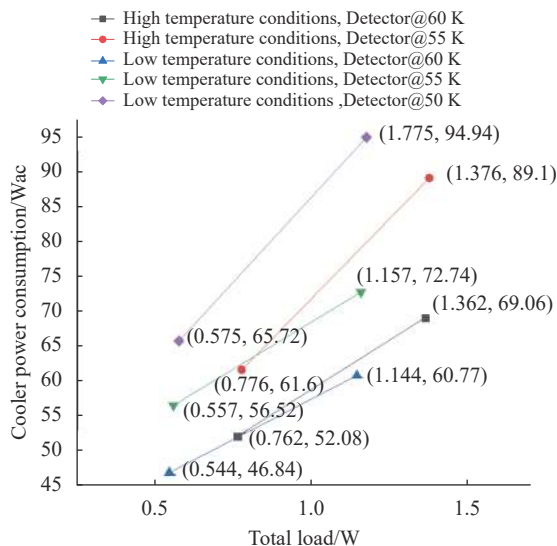


图 8 制冷机在不同工况下的制冷能力

Fig.8 Refrigeration Capacity of Cryocooler under Different Operating Conditions

3.3 低温光学用杜瓦组件的力学试验验证

为了验证柔性波纹管外壳结构的可靠性,需要对低温光学用制冷探测器杜瓦组件进行相应量级的力学考核,力学量级为 20~100 Hz (+3 dB/oct), 100~600 Hz

(0.01946 g^2/Hz), 600~2 000 Hz (-9 dB/oct)。并对力学前后的制冷探测器杜瓦组件的热力特性进行验证^[15], 试验流程如图 9 所示。试验前后制冷机功耗、波纹管两端温度梯度等数据如表 8 所示,试验发现制冷机功耗、波纹管两端温度梯度等测试结果均变化不大,且符合设计指标要求和项目要求,因而可以判定所设计的波纹管及低温光学用柔性外壳杜瓦通过力学振动试验^[16]。

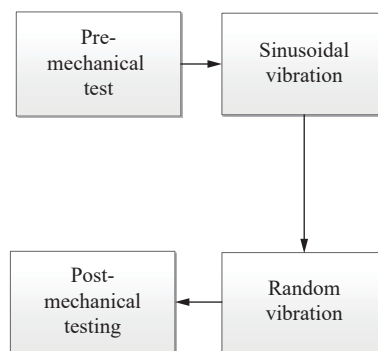


图 9 大组件正弦、随机振动试验流程图

Fig.9 Flow chart of sinusoidal and random vibration test of integrated detector dewarcoller assembly

表 8 力学前后数据对比

Tab.8 Comparison of data before and after mechanical test

Refrigerator working condition	Temperature of detector/K	Before mechanical test		After mechanical test	
		Cooler power consumption/Wac	Insulation effect of bellows/K	Cooler power consumption/Wac	Insulation effect of bellows/K
High temperature conditions (pulse 263 K, window cap 228 K)	60	52.08	37.22	52.11	37.33
	60	69.06	39.11	69.61	39.42
	55	89.1	39.59	88.92	39.83
	55	61.6	40.93	61.48	41.09
	60	46.84	37.64	47.07	37.87
Low temperature conditions (pulse 228 K, window cap 193 K)	60	60.77	46.17	60.59	46.49
	55	72.74	48.91	72.66	49.15
	55	56.52	48.06	56.80	48.01
	50	65.72	46.63	65.59	47.10
	50	94.94	48.28	94.66	48.57

4 结 论

文中结合低温光学用杜瓦隔热、低温应力和防过定位以及降低杂散辐射照度的要求,提出了制冷组件杜瓦主体(窗口、窗口帽和引线盘) 200 K 低温保持,

与制冷机膨胀机散热面柔性波纹管绝热连接的设计思想。对某长波 2 000×12 元低温光学用杜瓦的波纹管结构进行了设计和软件仿真,对波纹管柔性外壳结构的设计原理、设计方法进行了研究,通过对波纹管实际漏热测定以及低温光学杜瓦的低温试验、力学振

动试验,实现了 200 K 低温窗口,探测器 60 K 工作,杜瓦漏热为 544 mW,波纹管冷端和热端温度梯度为 37 K,热阻为 1 142 K/W。验证了柔性波纹管杜瓦外壳结构设计结果的正确性,为后续柔性波纹管外壳在低温光学用杜瓦组件的工程化应用提供了重要参考。

致谢:感谢徐琳、蒋梦蝶、孙闻、张磊、张晶琳、赵振力、周祝梅、王煜宇等在波纹管热阻测定中的工作,感谢左志强、姜佳维、张勇、唐玉俊、张渊哲等在探测器制冷组件热真空试验中的工作,感谢林春研究员、陈凡胜研究员对于探测器制冷组件相关工作的指导,感谢李雪研究员对文中提出的宝贵意见。

参考文献:

- [1] Liu Enguang. Research on key technologies of cryogenic integration of cold optical system [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese)
- [2] Wang Wei . The Research of staring wide field of view optic system based on geostationary orbit [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2015. (in Chinese)
- [3] Chen Fansheng, Hu Zhuoyue, Li Xiaoyan, et al. Research on wide-range and high-resolution thermal infrared remote sensing imaging technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1210002. (in Chinese)
- [4] Wang Yang, Meng Qingliang, Zhao Zhenming, et al. Thermal design of all-optical path cold chain based on transmission-type cryogenic optical infrared camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200345. (in Chinese)
- [5] Hu Zhuoyue. Research on key technologies of quantitative measurement of wide-range and high-resolution thermal infrared imager [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [6] Li Jun. Key technologies of Dewar packaging for ultra-large scale linear infrared focal plane array [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [7] Li Chunlai, LV Gang, Yuan Liyin, et al. Laboratory calibration and application of the airborne thermal infrared hyperspectral imager (ATHIS) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20190117. (in Chinese)
- [8] Li Jun, Wang Xiaokun, Sun Wen, et al. The study of thermal characteristics of the multi-substrate precision butting of the space long cold platform at low temperature [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(5): 1268-1274. (in Chinese)
- [9] Huang Naining. Research on metal bellows of special purpose[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [10] Chen Fang, Gao Chao, Luo Shikui. Cold head supporting structure of Dewar used in large infrared focal plane [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20200060. (in Chinese)
- [11] Mou Jian, Hong Guotong. The thermal contact resistance of two interfaces at low temperature in vacuum [J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2018, 24(1): 19-25. (in Chinese)
- [12] Zhang W Y. Heat Transmission of Welding[M]. Beijing: China Machine Press, 1989. (in Chinese)
- [13] Wang Zhen. Research on interface thermal resistance of cryogenic packaging for infrared focal plane assembly[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020. (in Chinese)
- [14] Chen Boliang, Li Xiangyang. Infrared Imaging Detectors for Space Applications[M]. Beijing: Science Press, 2016: 74-75. (in Chinese)
- [15] Li Jun, Wang Xiaokun, Sun Wen, et al. Study on Dewar package for dual-band long linear IRFPA detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1104003. (in Chinese)
- [16] Fan Guangyu, Fan Cui, Li Jun, et al. Cold strap design of long linear IRFPA dewar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2021-2026. (in Chinese)