

## 大面阵红外焦平面杜瓦冷指支撑结构设计

陈 芳, 高 超, 罗世魁

(北京空间机电研究所, 北京 100049)

**摘 要:** 空间红外相机为提高成像质量, 采用脉冲管制冷机对大面阵红外探测器进行制冷和杜瓦封装, 形成杜瓦组件, 使探测器工作在深低温环境下。冷指与热端之间仅靠脉冲管的薄壁结构连接, 径向支撑刚度偏低, 无法承受卫星发射阶段的振动, 需对冷指增加支撑结构; 但为提高制冷效率, 又需要尽量增大连接探测器的冷指与制冷机热端之间的结构热阻, 以减少结构间漏热。传统的方案是在冷指与热端之间增加金属支撑柱, 但该结构会带来附加的漏热, 且因为连接刚度较大, 会由于装配及加工误差在脉冲管焊缝处产生较大的结构应力, 影响组件性能。提出一种基于玻璃纤维束的冷指支撑结构, 利用玻璃纤维束的高抗拉刚度及低抗弯刚度提高冷指径向支撑刚度的同时减小其在轴向上的结构应力; 同时, 玻璃纤维束的超低导热系数和小截面面积可以极大的提高结构热阻, 显著减小附加漏热。与传统方案相比, 玻璃纤维束支撑加强结构在提高冷指支撑刚度同时, 将冷指与热端之间的结构热阻增大为原来的 3 730 倍, 解决了冷指支撑加强结构既要求抗振性能好、又要求漏热小的难题, 可适用于各种类型的大面阵红外探测器的杜瓦冷指支撑结构。

**关键词:** 红外焦平面; 杜瓦; 制冷; 玻璃纤维

**中图分类号:** V443<sup>+</sup>.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200060

## Cold head supporting structure of Dewar used in large infrared focal plane

Chen Fang, Gao Chao, Luo Shikui

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** To improve the imaging quality, a pulse tube cryocooler is used in the remote sensor, and it is installed in the Dewar assembly to make the infrared focal plane work in very low temperature. The thermal resistance between the cold head and the heat head should be big enough to improve the refrigeration efficiency of the pulse tube cryocooler. The thin-walled pulse tube connects the cold head and the heat head, and its radial support stiffness is too low to bear the vibration of satellite during launching. The traditional scheme is to add metal pole support structure, but the structure will bring additional heat leakage and the thermal deformation caused by the temperature difference of metal pole structure will cause the detector deformation, which will affect the imaging quality. A glass fiber support structure was proposed. The glass fiber had the advantages of high tensile modulus, low thermal conductivity and very small area, and with reasonable position design this structure will improve the radial support stiffness and reduce the heat leakage. Because of the characters of low bending stiffness, the thermal deformation cannot pass to the detector. Compared with the metal pole support structure, the thermal resistance of glass fiber support structure increases by 3 730 times, and solves the problems of high vibration resistance and low heat leakage.

收稿日期: 2020-02-05; 修订日期: 2020-03-16

作者简介: 陈芳 (1985-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事航天遥感相机结构设计方面的研究。Email: happystraw@126.com

**Key words:** infrared focal plane; Dewar; refrigeration; glass fiber

## 0 引言

近年来,红外成像技术以其成像质量好和抗干扰能力强等优点在卫星遥感相机上得到广泛应用,红外相机也朝着大视场、长焦距、高分辨率的方向发展。作为空间红外相机的核心部件,红外面阵探测器随着性能要求的不断提高,器件的规模尺寸不断扩大,灵敏度不断提高,以满足我国新型卫星有效载荷对地观测的需求<sup>[1-3]</sup>。

为了提高空间红外面阵探测器的成像质量和灵敏度,探测器需要工作在深低温环境(80 K 以下),因此,需要对探测器进行制冷,并对其进行杜瓦封装,使其形成杜瓦组件。脉冲管制冷机由于其寿命长、结构简单、机械振动小、制冷效率高等技术优势,已经替代辐射制冷机成为空间红外相机面阵探测器制冷的首选。空间红外相机一般采用体积小的同轴型脉冲管制冷机,其由压缩机、膨胀机、热端、脉冲管、回热器、冷指等结构组成,其中热端、脉冲管、回热器、冷指与探测器进行杜瓦封装形成杜瓦组件<sup>[4-5]</sup>。脉冲管为薄壁管状结构,一端连接热端,另外一端连接冷指,为保证结构的气密性,脉冲管与热端和冷指均通过焊接结合。红外面阵探测器通过导热胶与冷指粘接,冷指为探测器提供低温环境。

为了提高制冷效率,冷指截面需足够大,以便实现与探测器的全面积接触导热,冷指材料选用导热性能好的铜,且为实体结构。目前,红外探测器多采用拼接方式实现大面阵焦面要求,尺寸为几十毫米,甚至上百毫米,焦面增加后探测器质量、导热胶质量、冷指结构质量等均随之增加,其重量不容忽视。在悬臂状态下,脉冲管的薄壁焊缝处应力水平偏高,承受卫星主动段载荷时,焊缝强度不够,容易出现裂缝甚至断裂,会使制冷机性能下降、不稳定、乃至最终无法正常工作<sup>[6]</sup>。因此,需要对冷指与杜瓦组件之间增加支撑结构,提高整体结构的刚度,但传统的支撑结构热阻较低,会带来附加漏热,降低制冷效果;同时,在多个方向的刚性约束会附加由于加工及装配误差带来的结构应力。

文中提出一种基于玻璃纤维束的冷指支撑结构,

通过合理布局,利用玻璃纤维束的高抗拉刚度及低抗弯刚度提高冷指的径向支撑刚度的同时减小其在轴向上的结构应力;同时,玻璃纤维束的超低导热系数和截面积可以极大地提高结构热阻,显著减小附加漏热。与传统方案相比,玻璃纤维束支撑加强结构在提高冷指支撑刚度的同时,结构热阻增大为原来的 3 730 倍,解决了冷指支撑加强结构既要求抗振性能好、又要求漏热小的难题,可适用于各种类型的大面阵红外探测器的杜瓦冷指支撑结构。

## 1 杜瓦冷指支撑结构设计

### 1.1 传统杜瓦冷指支撑结构

对用于大面阵红外探测器的制冷机,为降低冷指端脉冲管焊缝处的应力水平,一般在冷指与杜瓦组件之间增加支撑结构,传统常采用金属支撑柱的结构型式<sup>[6]</sup>,如图 1 所示。传统支撑柱结构在应用中存在以下两个主要问题,一定程度上限制了红外相机的性能:(1) 面阵的增加带来了悬臂末端质量的增加,为提升支撑柱的结构刚度,支撑柱直径难以减小,由于冷热两端温差较大(温差 230 K 左右),即使采用导热系数较低的钛合金材料,也会通过支撑柱产生不小的附加漏热;(2) 支撑柱两端采用螺钉刚性连接,考虑到加工误差及装配误差,支撑柱与脉冲管之间很容易产生变形不协调,进而增加脉冲管焊缝处的应力,甚至使探测器产生变形和刚体位移,探测器焦面面积增加会进一步放大变形带来的误差。

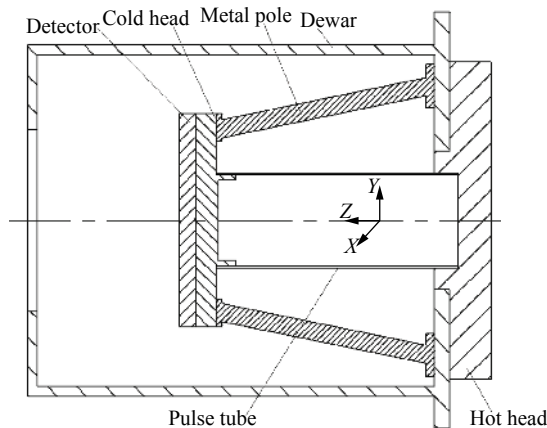


图 1 传统冷指金属支撑结构

Fig.1 Traditional metal pole support structure

### 1.2 杜瓦冷指的纤维束支撑结构设计

从图 1 的金属杆支撑结构可以看出:当没有金属杆支撑结构时,冷指靠脉冲管约束定位,脉冲管约束住了冷指 Z 轴平动以及绕 Z 轴转动的自由度。但由于脉冲管是悬臂构型,其对冷指 X、Y 向(径向)平移以及绕 X、Y 轴的转动约束较弱。传统金属杆支撑结构通过金属杆进一步加强了对冷指 XY 平面内平动自由度及绕 X、Y 轴转动自由度的约束,但同时带来了影响相机性能的 3 个问题。因此,新设计的结构需要在加强对冷指 XY 平面内平动自由度及绕 X、Y 轴转动自由度的约束的同时,一方面减小支撑结构的截面积以增加结构热阻,另一方面减小支撑结构在 Z 轴方向的刚度以减弱对脉冲管的过定位约束。

由材料力学可知,对内径为  $d$ 、外径为  $D$  的等截

面圆杆,其抗拉刚度为  $E \frac{\pi(D^2-d^2)}{4}$ ,抗弯刚度为  $E \frac{\pi(D^4-d^4)}{64}$  ( $E$  为材料的弹性模量)。杆的抗拉刚度与直径的平方成正比,而杆的抗弯刚度与直径的四次方成正比。为了在相同约束强度下减小支撑结构截面积,就需要用抗拉刚度代替抗弯刚度实现对冷指 XY 平面内平动自由度的约束,即将支撑结构置于 XY 平面内;当支撑结构位于 XY 平面内后,其在 Z 轴方向的约束由其抗弯刚度决定,可以通过减小支撑结构直径的方式,实现减小支撑结构抗弯刚度的同时对抗拉刚度影响较小,最终使得支撑结构由杆退化为线,由于单根纤维束只能提供一维高抗拉刚度,因此在 XY 平面内纤维束正交分布,形成如图 2 所示的纤维束支撑结构,为冷指在 XY 平面内提供多方向支撑刚度。

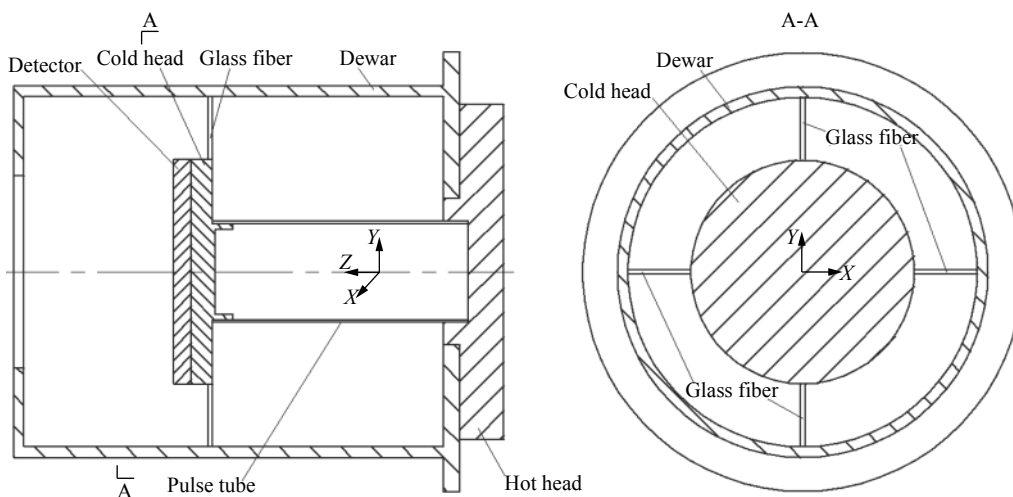


图 2 冷指的纤维束支撑结构

Fig.2 Fiber support structure of cold head

选用 1 mm 直径的玻璃纤维束做支撑结构,其刚度参数如表 1 所示,可知其抗拉刚度很高时其抗弯刚度较低,这样形成的纤维束支撑可以解除传统支撑结构对冷指的过约束,减小支撑结构匹配误差带来的应力变形,以及减小由于冷热端温差带来的冷指面变形。

表 1 玻璃纤维束支撑结构的刚度参数

Tab.1 Stiffness parameter of glass fiber support structure

	Tensile stiffness/N	Bending stiffness /N·m <sup>2</sup>
Glass fiber	1.963×10 <sup>5</sup>	0.012 2

### 2 杜瓦冷指支撑结构的材料选择与热阻分析

按照制冷机要求,冷指与杜瓦组件之间的支撑结构的热阻越大,通过支撑结构传导的热量越少,制冷效果越好。结构传导热阻  $R$  可由两端面之间的距离  $L$ 、截面面积  $A$  和材料导热系数  $\lambda$  确定<sup>[7]</sup>,公式为:

$$R = \frac{L}{\lambda A} \quad (1)$$

由于采用了悬挂支撑结构设计,支撑结构由外径  $\Phi 6$  mm、壁厚为 0.5 mm 的金属圆环面转变为直径为  $\Phi 1$  mm 的纤维束圆面,截面面积缩小为原来的 9.1%,

热阻大大减小。为进一步减小热阻,需要对纤维束材料进行优选,表 2 列出了 3 种常用的纤维束材料性能,玻璃纤维的导热系数远小于碳纤维和聚酰亚胺纤维的导热系数,其拉伸强度也满足系统结构力学要求,因此,选用玻璃纤维。相对于金属杆支撑结构,即使选用导热系数很低的钛合金材料 (15.6 W/(m·K)),也远远高于玻璃纤维束的导热系数。

选用玻璃纤维束的悬挂支撑结构与金属杆支撑

结构的结构参数如表 2 所示,其热阻计算结果见表 3,可知采用新结构的热阻是原结构的 3 730 倍。

表 2 纤维材料性能

Tab.2 Capability of fibers

	Thermal conductivity/ W·(m K) <sup>-1</sup>	Tensile strength/ GPa
Glass fiber	0.046	2.43
Polyimide fiber	0.35	3.6
Carbon fiber (M40)	20	4.43

表 3 冷指不同支撑结构的热阻

Tab.3 Thermal resistance of different support structures of cold head

	Length /mm	Area /mm <sup>2</sup>	Thermal conductivity /W·(m K) <sup>-1</sup>	Thermal resistance /K·W <sup>-1</sup>
Glass fiber support structure	40	0.785	0.046	1 107 726.39
Metal pole support structure	40	8.635	15.6	296.94

利用 Patran 对玻璃纤维束支撑结构和金属杆支撑结构进一步模拟热分析发现,在冷指的温度为 60 K,热端的温度为 290 K 的条件下,由于结构热阻的差别,冷指金属杆支撑结构的杜瓦外壳温度比冷指

玻璃纤维支撑结构的杜瓦外壳温度要低 60 K,分析结果如图 3 所示。这说明冷指玻璃纤维支撑结构有效地减小了热端与冷指之间的漏热,可降低杜瓦组件的热负载。

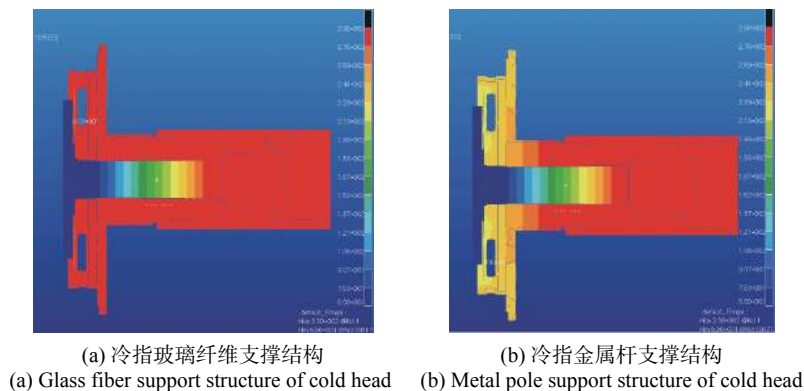


图 3 不同支撑结构温度分布图

Fig.3 Temperature field of different support structures

在上述分析基础上,分别对玻璃纤维束支撑结构和金属杆支撑结构进行了漏热测试实验,将冷指温度降至 60 K,在制冷机输出功率相同的情况下,控制杜瓦结构达到工作温度-30 ℃时,测得采用玻璃纤维束支撑结构冷指的最高热负载为 2.4 W,而使用金属杆支撑结构的最高热负载仅为 1 W,玻璃纤维束支撑结构可承受更高的热负载。

### 3 杜瓦冷指支撑结构力学分析

玻璃纤维束支撑结构冷指具有更好的热阻效应,

为了更好地验证该支撑结构的适用性,还需要对其结构力学特性进行分析,以确保其良好的静态和动态力学特性。分析例和试验例中的大面阵红外探测器尺寸为 40 mm×50 mm,冷指的截面直径为 Φ68 mm。

#### 3.1 结构支撑刚度分析

对玻璃纤维束支撑结构的径向支撑刚度进行力学分析,计算冷指在径向平面内沿不同方向下的重力的变形,重力方向沿 X 轴方向为 0°,计算结果如图 4 所示,冷指在不同方向下的重力的变形均很小,当重

力与玻璃纤维束夹角为 45°时,冷指重力变形最大,为 0.437 μm,满足冷指应用的需要,可见玻璃纤维束支撑结构为冷指提供了良好的径向支撑刚度。

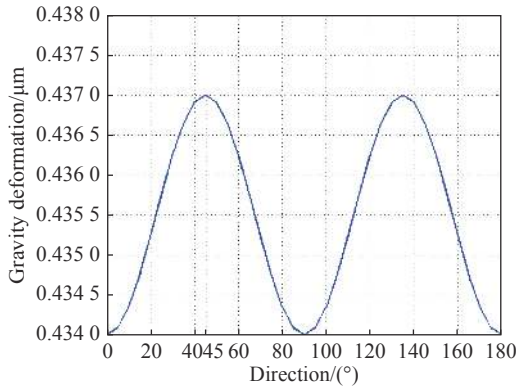


图 4 冷指在不同方向重力作用下的变形

Fig.4 Gravity deformation of cold head in different directs

### 3.2 结构振动分析

将张紧的玻璃纤维束视为弦,两端固定的弦的横向振动方程<sup>[8-10]</sup>为:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (2)$$

式中:  $y(x,t)$  为弦上距原点  $x$  处的截面在时刻  $t$  的横向位移;  $\rho$  为弦的密度;  $T$  为弦的张紧应力;  $L$  为弦长。两端固定的弦的边界条件为:  $y(0)=y(L)=0$ 。根据边界条件解微分方程得到玻璃纤维束的横向振动的固有频率<sup>[8-10]</sup>为:

$$f_i = \frac{i}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}}, (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

式中:  $i$  为横向振动固有频率的阶数。

可见,张紧的玻璃纤维束的固有频率与弦长、纤

维密度和张紧应力有关,其中,弦长和密度由结构构型和纤维材料性质决定。因此,固有频率的大小主要由张紧应力的大小来调整,可通过张紧应力设计调整支撑结构动态响应特性,以使其满足相机设计要求。

以某型号相机为例,玻璃纤维束的密度为 2.5 g/cm<sup>3</sup>,直径为 1 mm,弦长为 40 mm,杜瓦组件结构要求玻璃纤维束一阶振动频率大于 250 Hz。通过分析玻璃纤维束的一阶振动频率随张紧应力的变化曲线(如图 5 所示)发现,张紧应力越大,一阶振动频率越高,当张紧应力达到 1 MPa 时,纤维束一阶频率即达到 250 Hz;但考虑纤维束的蠕变效应,张紧应力应取一定的安全余量(工程上安全系数取 2),张紧应力为 2 MPa 时,一阶振动频率为 353 Hz,可满足相机设计要求。

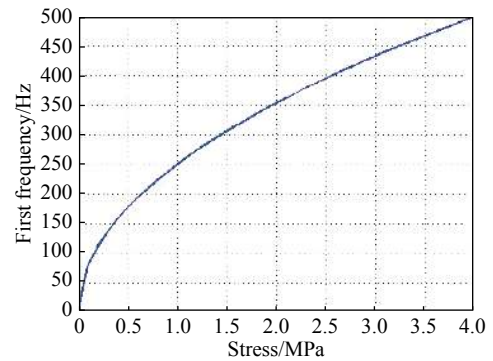


图 5 一阶振动频率随张紧应力的变化曲线

Fig.5 Curve between first frequency and stress

对采用玻璃纤维束支撑的杜瓦组件进行动力学仿真分析,计算结构在均方根为 5 Grms 的随机振动下的力学情况,与采用金属杆支撑的杜瓦组件进行对比,应力分布情况如图 6 所示,可知采用玻璃纤维束支撑结构的杜瓦组件应力远远小于传统金属杆支撑

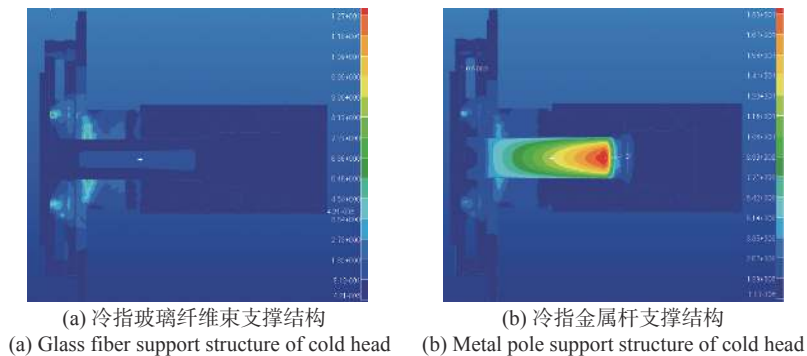


图 6 随机振动分析 (5 Grms) 应力分布图

Fig.6 Stress field of random vibration analysis (5 Grms)

结构。不同支撑结构的冷指的振动响应幅值及脉冲管应力数据如表 4 所示。

为了验证振动分析,对采用玻璃纤维束冷指支撑结构的红外焦面组件进行了均方根为 5 Grms 的 XYZ 三个方向的随机振动,实验结果如图 7 所示。从试验曲线可知:组件基频为 358 Hz,与计算结果

相符。

振动前后 3 坐标测试冷指与杜瓦结构的相对位置变化小于 1 μm,显示焦面组件未发生结构变形;功能测试显示焦面正常工作所需制冷功率无变化。综合来看,玻璃纤维束支撑结构的力学性能满足设计需求。

表 4 杜瓦组件力学分析结果

Tab.4 Mechanical analysis results of Dewar

	Frequency/Hz	Magnification	Stress of pulse tube/MPa
Glass fiber support structure	370	4.2	1.08
Metal pole support structure	231	4.9	18

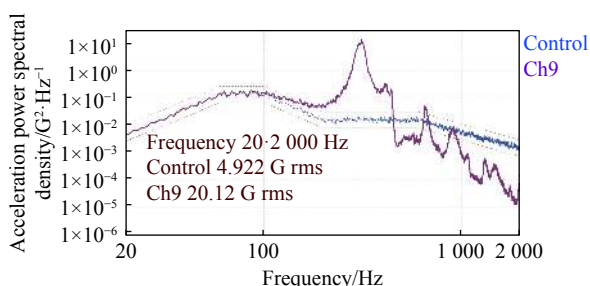


图 7 玻璃纤维束冷指支撑结构的随机振动试验曲线 (5 Grms)

Fig.7 Random vibration curve of glass fiber support structure (5 Grms)

#### 4 制备工艺

某遥感相机的红外焦面组件中采用了玻璃纤维束冷指支撑结构。冷指和杜瓦结构件均为金属结构,按照设计要求采用机械加工即可完成,玻璃纤维束安装方法如下:(1) 将待装配结构固定在工装上,将玻璃纤维束按照顺序穿插至冷指和杜瓦结构的安装槽内,玻璃纤维束两端留出工艺段;(2) 玻璃纤维束两端施加预紧力,使玻璃纤维束处于预设的拉紧状态,此时玻璃纤维束与安装槽之间没有任何连接和定位;(3) 在安装槽内注入低温胶,通过胶接实现玻璃纤维束与冷指及杜瓦结构之间的装配;(4) 待胶完全固化后,将整个组件从工装上取下,清理玻璃纤维束工艺段和多余的胶即可。这种安装方式既实现了玻璃纤维束与结构之间的连接,又解决了传统方案中的装配应力的问题。

在实施过程中需注意:(1) 胶量要适当,如胶量过多,胶会因毛细作用沿着玻璃纤维束爬升,胶液固化

后会改变玻璃纤维束纤维间的拓扑结构进而影响其刚度,可采用分次分段固化的方法避免此种情况;(2) 由于处于张紧状态,玻璃纤维束走线时需保证过线部位无尖锐的棱角,以免割伤纤维束。

#### 5 结论

针对大面阵红外焦平面杜瓦组件设计了一种基于玻璃纤维束的高热阻的冷指支撑结构,对该支撑结构的热性能、力学性能以及制备工艺进行了全方面的分析。玻璃纤维束的低导热系数和小截面可提高结构热阻,减小漏热,热阻是传统方案的 3 730 倍;通过合理布局,利用玻璃纤维束的高抗拉刚度低抗弯刚度特性,在不影响冷指轴向支撑刚度的情况下,提高了冷指径向的支撑刚度,配合注胶方式的装配连接,可解决装配应力问题。该技术在某遥感相机中得以应用,热性能和力学性能验证结果与分析结果一致,这种支撑结构解决了冷指支撑结构既要求抗振性能好、又要求漏热小的难题,适用于各种类型的有制冷要求的大面阵红外探测器结构。

#### 参考文献:

[1] Meng Lingjie, Guo Ding. Development status and prospect of high resolution imaging satellite in geostationary orbit [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(4): 1-6. (in Chinese)  
孟令杰,郭丁. 地球静止轨道高分辨率成像卫星的发展现状与展望[J]. *航天返回与遥感*, 2016, 37(4): 1-6.

[2] Yu Longjiang, Liu Yunhe. Development analysis on GEO civil

- optical earth observation satellites with mid-high resolution [J]. *Spacecraft Engineering*, 2013, 22(1): 106-112. (in Chinese)
- 于龙江, 刘云鹤. GEO中高分辨率民用光学对地观测卫星发展研究[J]. *航天器工程*, 2013, 22(1): 106-112.
- [3] Li Jun, Wang Xiaokun. Study on Dewar package for dual-band long linear IRFPA detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1104003. (in Chinese)
- 李俊, 王小坤. 超长线列双波段红外焦平面探测器杜瓦封装技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1104003.
- [4] Cai Jinghui, Zhao Miguang. The pulse tube cryocooler of GF-4 satellite staring camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(4): 66-71. (in Chinese)
- 蔡京辉, 赵密广. “高分四号”卫星凝视相机脉冲管制冷机[J]. *航天返回与遥感*, 2016, 37(4): 66-71.
- [5] Yu Liquan, Mo Defeng. Research progress on cold platform materials for cooled focal plane detector assembly [J]. *Infrared*, 2019, 40(4): 1-11. (in Chinese)
- 余利泉, 莫德锋. 制冷焦平面探测器组件冷平台材料研究进展[J]. *红外*, 2019, 40(4): 1-11.
- [6] Liu Shaoshuai, Jiang Zhenhua. Study on high energy efficiency 30 K single-stage pulse tube cryocooler for a space infrared detector [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2018, 37(4): 403-410. (in Chinese)
- 刘少帅, 蒋珍华. 空间红外探测用30 K单级脉冲管制冷机高效研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(4): 403-410.
- [7] Luo Shikui, Cheng Guimei. Thermal adapter of HgCdTe large plane arrays detector based on carbon fiber with high heat conductivity used in infrared space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0704001. (in Chinese)
- 罗世魁, 成桂梅. 基于高导热碳纤维的HgCdTe大面阵探测器热适配结构在空间红外遥感相机中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0704001.
- [8] Gan Quan, Huang Yonghui. Practical formulas for vibration based method of tension estimation for cables with fixed boundaries [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(1): 59-65. (in Chinese)
- 甘泉, 黄永辉. 基于振动频率法的两端固支拉索索力计算实用公式[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(1): 59-65.
- [9] Geier R, De Roeck G, Flesch R. Accurate cable force determination using ambient vibration measurements [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2006, 2(1): 43-52.
- [10] Huang Biao, Zhu Xiaolong, Mao Yongjian. Vibration response of a mass subjected to a concentrated force moving on a string with distributed load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(5): 159-162. (in Chinese)
- 黄彪, 朱小龙, 毛勇建. 受集中力质量在受分布力弦上移动时的振动响应分析[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(5): 159-162.