

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

罗世魁, 成桂梅

(北京空间机电研究所, 北京, 100094)

摘要: HgCdTe 面阵探测器是空间红外遥感相机的关键部件, 随着性能需求的不断提高, 器件的规模尺寸不断扩大。HgCdTe 面阵探测器在常温下与承载板进行装配, 但在深冷状态下工作, 需要耐受 200 K 左右的温度波动。由于探测器与承载板的线膨胀系数不匹配, 温度波动会引起探测器翘曲变形, 变形严重时, 将导致探测器损伤。提出基于高导热碳纤维的 HgCdTe 大面阵探测器热适配结构, 以碳纤维的轴向高热导率降低结构热阻, 以碳纤维的极小抗弯截面模量实现热适配结构两端面间的刚度解耦。相对于探测器与承载板直粘, 引入基于高导热碳纤维的热适配结构后, 探测器与承载板间的热阻仅增加了约 1%, 而探测器热失配翘曲变形衰减了 99.9%, 解决了大面阵探测器与承载板间的热失配翘曲变形损伤问题。并对基于碳纤维的热适配结构制备工艺方案进行了简单介绍。

关键词: 热适配结构; HgCdTe 面阵探测器; 空间红外遥感相机; 碳纤维; 悬臂梁; 线膨胀系数

中图分类号: V447⁺.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0704001

Thermal adapter of HgCdTe large plane arrays detector based on carbon fiber with high heat conductivity used in infrared space camera

Luo Shikui, Cheng Guimei

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

Abstract: HgCdTe plane array detector is a key component in infrared space camera. The scale of detector is enlarging continuously due to the unending requirements of better performance. HgCdTe plane array detector needs to be mounted on loading board in room temperature, and it needs to work at deep cooling environment, temperature fluctuation at about 200 K should be endured. Temperature fluctuation leads to warping deformation of detector due to mismatch of CTE between detector and loading board, and large warping deformation results in damage in detector. Then thermal adapter of HgCdTe focal plane arrays based on carbon fiber with high heat conductivity was proposed. High axial heat conductivity of carbon fiber was adopted to reduce thermal resistance of adapter, and minimal section bending modulus of carbon fiber was adopted to decouple the stiffness between two end faces of thermal adapter.

收稿日期: 2015-11-20; 修订日期: 2015-12-12

作者简介: 罗世魁(1975-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事航天遥感相机研制工作。Email: shk_1@sina.com

Compared with direct bonding assembly between detector and loading board, after the adoption of thermal adapter based on carbon fiber with high heat conductivity, thermal resistance between detector and loading board was increased by merely about 1 percent, but warping deformation of detector due to mismatch of CTE was reduced by more than 99.9 percent. Problem of damage on large scale detector due to mismatch of CTE was resolved. Manufacture process of thermal adapter based on carbon fiber was briefly introduced.

Key words: thermal adapter; HgCdTe plane array detector; infrared space camera; carbon fiber; cantilever beam; coefficient of thermal expansion(CTE)

0 引言

HgCdTe 面阵探测器是红外空间遥感相机的关键部件。随着性能需求的不断提高,器件的规模尺寸不断扩大。国外 HgCdTe 面阵探测器的规模已经达到 4 096×4 096^[1-3],国内也在向 2 560×2 560 迈进。

HgCdTe 面阵探测器需要工作在深冷环境,而空间遥感相机的主体温度一般控制在室温附近,因此一般需要对 HgCdTe 面阵探测器进行制冷,并对其进行杜瓦封装^[4-6]。在杜瓦内,探测器一般安装在承载板上,承载板另一面连接低温冷指。承载板负责将冷量由冷指传递给探测器,为了减小冷指与探测器之间的热阻,探测器与承载板之间一般采用大面积胶接。

探测器的工作环境一般为深冷状态,比如温度 60 K;探测器与承载板的装配环境、存储环境,一般为室温状态,比如 293 K;探测器随空间遥感相机的发射环境一般也是室温状态;在轨环境下,非工作状态时,探测器一般也处于室温状态。可见,探测器与承载板组合体所处环境存在 200 K 左右温度波动。

探测器的等效线膨胀系数与承载板的材料线膨胀系数一般不是匹配的,温度波动时,线膨胀系数的失配会引起探测器翘曲变形,变形严重时,将导致探测器损伤。为了控制热失配翘曲变形^[7-8],现有的方法是选择合适的材料进行承载板的制备,使承载板的线膨胀系数与探测器的等效线膨胀系数尽量匹配。甚至在承载板与探测器间引入特定线膨胀系数的过渡层(热适配结构),以使承载板与热适配结构的总等效线膨胀系数与探测器的等效线膨胀系数尽量匹配。

线膨胀系数的匹配设计,解决了小规模探测器

(比如 320×256)的热失配翘曲变形损伤问题。但由于线膨胀系数难以严格匹配,当探测器规模增大时(比如 2 560×2 560),探测器的翘曲变形迅速增加,热失配损伤问题又凸显出来。

该背景下,文中提出基于高导热碳纤维的 HgCdTe 大面阵探测器热适配结构,以碳纤维的轴向高热导率降低结构热阻,以碳纤维的极小抗弯截面模量实现热适配结构两端面间的刚度解耦,解决了空间红外遥感相机中 HgCdTe 大面阵探测器与承载板间的热失配翘曲变形损伤问题。

1 线膨胀系数匹配设计及存在问题

线膨胀系数匹配设计,是依据现有的探测器,选择特定线膨胀系数的材料制备承载板,使承载板的线膨胀系数与探测器的等效线膨胀系数尽量匹配。

HgCdTe 面阵探测器是多层结构,如图 1 所示,一般由 Si 衬底层、HgCdTe 层、In 柱层(填胶)、Si 读出电路层、环氧胶粘接层、引线基板层(蓝宝石或陶瓷)组成。所有层制备材料的线膨胀系数各不相同,且各线膨胀系数随温度变化^[9],变化规律一般不是线性的,也各不相同。因此,HgCdTe 面阵探测器的横向等效线膨胀系数是一个关于温度的复杂函数。

为了保证探测器平面等温性,降低因温度梯度而引起的热应力,承载板要具有高的横向热导率,以减小承载板平面温度梯度;为了减小冷指到探测器之间的热阻,承载板要具有高的纵向热导率;为了能够承载探测器、遮光罩等安全通过发射段振动与加加速度过载,承载板需要具有一定的结构强度与结构刚度;另外承载板材料的选取还要考虑与冷指柱的连接工艺性(一般为焊接)。可见承载板的选材范围是受到很多限制的。

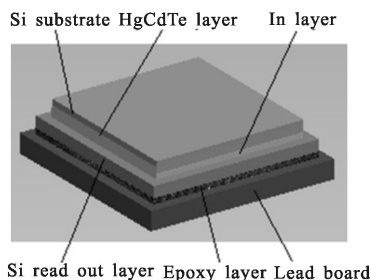


图 1 HgCdTe 面阵探测器结构

Fig.1 Structure of HgCdTe plane array detector

探测器的等效线膨胀系数复杂，承载板的选材范围受限，承载板的线膨胀系数与探测器的等效线膨胀系数完全匹配几乎是不可能的，工程中也很难达到足够匹配。温度变化时，探测器仍然存在热失配翘曲变形，只是相对于无匹配设计会小一些。若经线膨胀系数匹配设计后，热失配翘曲变形仍然不能被接受，工程中一般在探测器与承载板之间引入热适配结构，以使承载板与热适配结构的总等效线膨胀系数与探测器的等效线膨胀系数匹配性更好，但两等效线膨胀系数的匹配程度仍然是有限的。

线膨胀系数匹配设计，包括热适配结构的引入，将小规模探测器(比如 320×256)与承载板连接中的热失配翘曲变形降低到了可以接受的程度^[10-13]。但随着探测器规模的扩大(比如 2 560×2 560)，探测器与承载板连接中的热失配翘曲变形迅速增加，以现有的线膨胀系数匹配设计已经无法将该热失配翘曲变形控制在可接受范围了。

2 基于高导热碳纤维的 HgCdTe 大面阵探测器热适配结构

两粘接薄板之间的热失配翘曲变形，是由于温度变化时两薄板的平面内变形不一致，且两薄板之间存在平面内的强耦合刚度而产生的。线膨胀系数匹配设计，包括现有的热适配结构设计，都是以使两薄板之间的平面内变形尽量匹配的方式来减少翘曲变形。其实，也可以用减小两薄板间的平面内耦合刚度的方法来减少平面翘曲变形。

如果能设计一种热适配结构，它的两端面间具有低的平面内耦合刚度，上表面跟随探测器膨胀变形而不对其进行约束，下表面跟随承载板膨胀变形而不对其进行约束，那么探测器与承载板都将处于

自由膨胀的状态。简单薄板等温自由膨胀时，板面不产生翘曲变形。这样便可以彻底解决探测器与承载板之间的热失配翘曲变形问题。

这种热适配结构还需要具备另一个重要特性：两端面间的热阻要尽量小。两端面间的热阻 R 由两端面之间的距离 L 、两端面之间的截面面积 A 、两端面之间的材料热导率 λ 共同确定，其关系式为：

$$R=L/(\lambda A) \quad (1)$$

为了减小热适配结构两端面间的热阻，需要减小两端面间的距离，增大两端面间的截面面积，还需要选择轴向热导率高的材料。

在两端面间距离及两端面间截面面积一定的约束条件下，需设法减小热适配结构两端面间的平面内耦合刚度。圆截面悬臂梁的挠度计算公式和圆截面面积公式：

$$Y=\frac{4}{3\pi} \times \frac{pL^3}{E} \times \frac{1}{r^4} \quad (2)$$

$$s=\pi r^2 \quad (3)$$

式中： p 为悬臂梁的悬臂端垂轴集中作用力，如图 2(a) 所示； Y 为梁的悬臂端挠度； L 为悬臂梁长度； r 为悬臂梁的圆截面半径； E 为悬臂梁的材料弹性模量； s 为悬臂梁的圆截面面积。

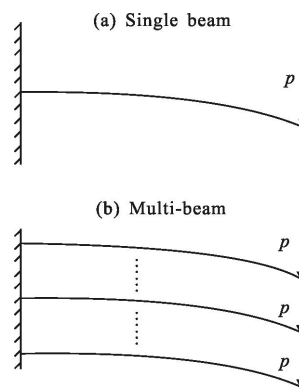


图 2 受垂轴集中力的圆截面悬臂梁

Fig.2 Cantilever beam with circular cross section under perpendicular concentrated force

公式(2)反映了圆截面悬臂梁在悬臂端集中力 p 作用下，悬臂端挠度 Y 与截面半径 r 的关系，将公式(2)改写一下：

$$p=\frac{3\pi}{4} \times \frac{EY}{L^3} \times r^4=3r \times \frac{EY}{L^3} \times w \quad (4)$$

式中： $w=\pi r^3/4$ ，是圆截面悬臂梁的抗弯截面模量，是

衡量悬臂梁弯曲刚度的参数, 随圆截面半径 r 的 3 次方线性减小。

公式(4)反应了圆截面悬臂梁悬臂端挠度 Y 一定时, 悬臂端集中力 p , 与截面半径 r 的关系。

由公式(3)及公式(4)可以看到, 悬臂梁的悬臂端集中力 p 随截面半径 r 的 4 次方线性增加, 而悬臂梁截面面积只随半径 r 的 2 次方线性增加, 即当 r 发生变化时, 悬臂端集中力 p 的变化速度快于截面面积 s 。

采用群梁的方法, 如图 2(b), 可以在保证总截面积 S 不变的情况下, 降低单根梁的截面积, 即降低单根梁的截面半径 r , 从而获得更小的悬臂端总集中力 P 。设群梁由 n 根截面半径 r 的梁组成, 则群梁总截面积 S 及群梁悬臂端总集中力 P 如公式(5)和(6)所示:

$$S = ns = n\pi r^2 \quad (5)$$

$$P = np = n \frac{3\pi}{4} \times \frac{EY}{L^3} \times r^4 \quad (6)$$

由公式(5)及公式(6)可以得到公式(7):

$$P = \frac{3}{4\pi} \times \frac{EY}{L^3} \times \frac{S^2}{n} \quad (7)$$

由公式(7)可以看到: 在悬臂梁长度 L 一定、悬臂梁挠度 Y 一定、悬臂群梁总截面积 S 一定的条件下, 悬臂群梁悬臂端总集中力 P 随梁的数量 n 线性减少。

如果用群梁来制备热适配结构, 群梁的截面积 S 由热适配结构的截面积确定, 群梁的长度 L 由热适配结构的两端面间距确定, 悬臂梁的挠度由承载板与探测器的膨胀变形差异确定, 热适配结构上表面跟随探测器膨胀变形, 下表面跟随承载板膨胀变形, 则群梁悬臂端总集中力 P 将决定热适配结构两端面间的平面内耦合刚度。集中力 P 增大, 则耦合刚度增大; 集中力 P 减小, 则耦合刚度减小。

由公式(7)可知: 只要群梁中梁的数量 n 足够大, 即梁的截面半径 r 足够小, 就可以使集中力 P 足够小, 即热适配结构两端面间的平面内耦合刚度足够小, 从而将探测器的热失配翘曲变形控制在可接受范围之内。

选取 Nippon 公司的 Ys-95A 高导热碳纤维^[14]来制备群梁式热适配结构, Ys-95A 碳纤维的单丝直径为 $7 \mu\text{m}$, 用于提供小的悬臂梁半径; Ys-95A 碳纤维的轴向热导率为 $600 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 用于提供高的热适配结构轴向热导率。碳纤维热适配结构及其与探测

器、承载板的装配示意图如图 3 所示。

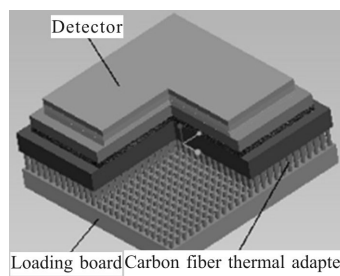


图 3 与探测器及承载板装配后的碳纤维热适配结构

Fig.3 Assembly structure of thermal adapter based on carbon fiber between detector and loading board

3 性能仿真与对比

为定量了解基于高导热碳纤维的 HgCdTe 大面阵探测器热适配结构性能, 对其与探测器、承载板的装配体进行仿真分析, 来获得探测器热失配平面翘曲变形量及探测器与承载板之间的热阻值。

为了方便对比, 也对探测器与承载板的直粘装配体进行了仿真分析。为了让仿真分析结果更具参考性, 探测器与承载板取相同形状的板 ($60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$), 材料均选硅, 但设定承载板的线膨胀系数比探测器大 $3 \text{ ppm}/\text{K}$ ($1 \text{ ppm} = 10^{-6}$); 热适配结构为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的板; 所有粘接剂都选用环氧胶, 探测器与承载板直粘时胶层厚度取典型值 0.1 mm ; 探测器与热适配结构粘接时, 由于热适配结构端面为多孔结构, 胶层厚度可以更薄, 取 0.03 mm , 承载板与热适配结构之间的胶层厚度也取 0.03 mm ; 温度变化量为 -200 K 。相关材料特性取典型值, 见表 1。

表 1 材料特性

Tab.1 Property of material

Part or material	Elastic modulus/GPa	CTE /ppm · K ⁻¹	Heat conductivity /W · m ⁻¹ · K ⁻¹
Detector(Si)	80	2	-
Loading board	80	2+3	-
Epoxy adhesive	3	60	3
Carbon fiber (Ys-95A)	900	-1.5	600

仿真分析结果见表 2, 与直接粘接相比, 引入基于高导热碳纤维的热适配结构后, 探测器与承载板间的热阻仅增加了约 1%。

表 2 装配体性能

Tab.2 Performance of assembly structure

Assembly method	Warping deformation of detector/ μm	Thermal resistance between detector and loading board/ $\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
With thermal adapter based on carbon fiber	0.03	0.009 3
With direct bonding	38.28	0.009 4

直接粘接时,探测器顶面的翘曲量为 $38.28\ \mu\text{m}$, 见图 4(a)。引入基于高导热碳纤维的热适配结构后,探测器顶面的翘曲量仅为 $0.03\ \mu\text{m}$,见图 4(b)。相对于探测器与承载板直粘,引入基于高导热碳纤维的热适配结构后,探测器热失配翘曲变形衰减了 99.9%,这一量级的翘曲变形量对于 HgCdTe 大面阵探测器而言是可以忽略不计的。

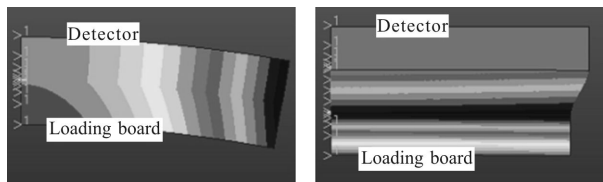


图 4 探测器的热失配翘曲变形

Fig.4 Warping deformation of detector due to mismatch of CTE

4 制备工艺方案

基于高导热碳纤维的 HgCdTe 大面阵探测器热适配结构,其实就是很短的一大束碳纤维,制备方法并不复杂。先将适当长度的无胶纤维束整齐地摆放在模具槽内;再合上模具滑块并加压;切断,精加工两端面,可以采用激光加工、水刀加工、或电加工等;超声波及高压气清洁;两侧涂胶,分别与探测器及承载板粘接;去除模具及多余的碳纤维,修整防护。热适配结构的制备及与探测器、承载板的装配过程就完成了。

其中有 3 点值得注意:(一)模具滑块加压时,压力要适当,压力太大会导致碳纤维粘连,压力太小会导致加工时散落,具体值可以通过试验得到;(二)高压气清洁时,需要用网板对已经加工好的碳纤维束板进行支撑,避免将碳纤维束板吹溃;(三)胶的黏度要适当,胶量要适当,在碳纤维束板两侧涂胶时,胶可能因毛细作用爬升至纤维间隙内,纤维束板将变成一整块纤维板,失去刚度解耦特性。

5 结束语

文中对空间红外遥感相机中 HgCdTe 面阵探测器与承载板的一般装配结构进行了介绍,对温度变化下,探测器因热失配而产生翘曲变形的机理进行了描述。现有热失配翘曲变形控制的方法是通过线膨胀系数的匹配设计使两探测器与承载板之间的平面内变形尽量匹配,该方法成功将小规模探测器的热失配翘曲变形控制在了可接受范围内。但由于承载板的线膨胀系数与探测器的等效线膨胀系数匹配困难,随着探测器规模的扩大,探测器与承载板连接中的热失配翘曲变形迅速增加,线膨胀系数匹配设计已经无法将探测器热失配翘曲变形控制在可接受范围了。

在悬臂梁长度一定、悬臂梁挠度一定、悬臂群梁总截面积一定的条件下,悬臂群梁悬臂端总集中力 P 随梁的数量而线性减少。根据这一规律,文中提出基于高导热碳纤维的 HgCdTe 大面阵探测器热适配结构,以碳纤维的轴向高热导率降低结构热阻,以碳纤维的极小抗弯截面模量实现热适配结构两端面间的刚度解耦。相对于探测器与承载板直粘,引入基于高导热碳纤维的热适配结构后,探测器与承载板间的热阻仅增加了约 1%,而探测器热失配翘曲变形衰减了 99.9%,解决了大面阵探测器与承载板间的热失配翘曲变形损伤问题。并对基于碳纤维的热适配结构制备工艺方案进行了简单介绍。

参考文献:

[1] Rutter J H, Libonate Jr G S, Robillard G, et al. Performance of the PV/PC HgCdTe focal plane/dewar assembly for the atmospheric sounder instrument (AIRS) [C]//SPIE, 1998, 3437: 249-260.

[2] He Li, Hu Xiaoning, Ding Ruijun, et al. Recent progress of the 3rd generation infrared FPAs [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 696-701. (in Chinese)
何力, 胡晓宁, 丁瑞军, 等. 第三代红外焦平面基础技术的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 696-701.

[3] Yuan Jijun. Review of infrared detector development [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(12): 1099-1102. (in Chinese)
袁继俊. 红外探测器发展述评 [J]. 激光与红外, 2006, 36(12): 1099-1102.

- [4] Xiong Xiong, Zhu Yingfeng, Wang Wei, et al. Die attach technology in HgCdTe IRFPA detector package [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(8): 444-447. (in Chinese)
熊雄, 朱颖峰, 王微, 等. HgCdTe 焦平面红外探测器封装中的芯片粘接技术[J]. 红外技术, 2012, 34(8): 444-447.
- [5] Zhu Yingfeng, Xiao Huishan, Tao Yanming, et al. The manufacture of military engineering minimize split FPA Dewar[J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(1): 59-62. (in Chinese)
朱颖峰, 肖徽山, 陶雁明, 等. 军用工程化微型分置式焦平面杜瓦[J]. 红外技术, 2006, 28(1): 59-62.
- [6] Marianne M, Xavier B, Philippe T. IR detector dewar and assemblies for stringent environmental conditions [C]//SPIE, 2007, 6542: 65422N.
- [7] Zhu Yingfeng, Han Fuzhong, Li Dongsheng, et al. MW 320 × 256 IRFPA detector under rapid cooling down [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (4): 1032-1036. (in Chinese)
朱颖峰, 韩福忠, 李东升, 等. 快速制冷启动的中波 320 × 256 红外焦平面探测器研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1032-1036.
- [8] Lin Ridong, Wang Xin, Meng Lingwei. Mechanical and heat analyze of the coldfinger structure of micro-dewar for infrared detector [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37 (11): 1206-1208. (in Chinese)
林日东, 王鑫, 孟令伟. 红外探测器用微型杜瓦冷指结构优化设计[J]. 激光与红外, 2007, 37(11): 1206-1208.
- [9] Hu Xiaoning, Zhang Haiyan, Li Yanjin, et al. Thermal stress analysis of HgCdTe focal plane arrays on Si substrates [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(11): 1020-1022. (in Chinese)
胡晓宁, 张海燕, 李言谨, 等. 硅基 HgCdTe 面阵焦平面器件结构热应力分析[J]. 激光与红外, 2006, 36(11): 1020-1022.
- [10] Wang Xiaokun, Zeng Zhijiang, Zhu Sangen, et al. Dewar for medium wave 2048 pixel long linear HgCdTe IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 611-614. (in Chinese)
王小坤, 曾智江, 朱三根, 等. 中波 2048 元长线列碲镉汞焦平面杜瓦组件[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 611-614.
- [11] Temma K, Sawa T, Iwata A. Two-dimensional stress analysis of adhesive butt joints subjected to cleavage loads [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1990(10): 285-293.
- [12] Nebiru Kiyuu Maasen, Teimosui Esu. Quick cooling/low strain hybrid-focal-point planar-array platform used in Dewar package of infrared-ray detector: Japan, 5149783 [P]. 1993-06-15.
- [13] Xavier B, Philippe T. IR detectors design and approach for tactical applications with high reliability without maintenance [C]//SPIE, 2008, 6940: 69400H.
- [14] Zhao Jiayang. A brief introduction to nippon graphite fiber corporation, Japan [J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2001, 6(4): 17-20. (in Chinese)
赵稼祥. 日本石墨纤维公司的沥青基纤维[J]. 高科技纤维与应用, 2001, 6(4): 17-20.
- [15] Zhang Yue, Zhou Feng, Ruan Ningjuan, et al. Overview of cryogenic refrigeration technology in space infrared astronomical telescopes [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(5): 46-55. (in Chinese)
张月, 周峰, 阮宁娟, 等. 空间红外天文望远镜低温制冷技术综述[J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(5): 46-55.