

文章编号: 1002-1582(2011)06-0675-04

大视场光学遥感器焦平面板的研制^{*}

齐光^{1,2}, 李景林¹, 刘磊¹, 王书新^{1,2}, 任建岳¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

(2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 焦平面板作为承载 TDICCD 器件的部件,其强度、动静态刚度、热稳定性直接影响到遥感器的成像质量。针对目前光学遥感器大视场、宽覆盖的发展趋势,设计了一种新型的焦平面板。选用性能指标优良的高体份 SiC/Al 复合材料,既满足了结构设计指标的要求,同时又大大降低了产品重量。通过有限元模拟仿真分析和相关试验,验证了设计方案的可行性。

关 键 词: 光学遥感器; 焦平面板; 高体份 SiC/Al 复合材料

中图分类号: V254; TH16

文献标识码: A

Development of focal plane plate of optical remote sensor with large field of view

QI Guang^{1,2}, LI Jinglin¹, LIU Lei¹, WANG Shuxin^{1,2}, REN Jianyue¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China)

(2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Focal plane plate is regarded as TDICCD bearing device, the strength, static and dynamic stiffness, thermal stability directly affect the image quality of optical remote sensors. For the current large field of optical remote sensor and trends of wide coverage, a new type of focal plane plate is designed. The good high volume fraction SiC / Al composites of performance specification are selected, both the requirements of the structural design specifications are met, and the weight is reduced greatly. The finite element analysis and related simulation test show that the scheme is feasible.

Key words: focal plane plate; high volume fraction SiC / Al composites; optical remote sensor

0 引 言

在对地观察、太空探测等领域中,空间光学遥感器具有重要的科学意义和军事意义^[1]。随着人们对光学遥感器高分辨、轻型、宽覆盖、多谱段等方面的要求,对光学遥感器的各个组成部分的设计要求也随之提高。由于现有的单片 CCD 成像器件的像元

总长度已经不能满足大视场、宽覆盖空间遥感器焦平面的使用要求,故需要将多片 CCD 器件连接成一个大视场 CCD 探测器阵列,即 CCD 的拼接。目前,绝大多数光学遥感器都采用 TDICCD 探测器拼接,以便达到成像焦平面的长度^[2]。

焦平面板作为 TDICCD 成像器件的承载部件,必须满足 TDICCD 拼接的精度要求,即 TDICCD 空

* 收稿日期: 2011-05-10; 收到修改稿日期: 2011-06-10

E-mail: ygwx01@163.com

基金项目: 国家 863 计划资助项目(863-2-5-1-13B)

作者简介: 齐光(1981-),男,助理研究员,硕士研究生,主要从事空间光学仪器、空间光学仪器光机结构设计的研究。

间相对位置的要求。

(1) 搭接要求。指上一片 TDICCD 的最后一个有效像元与下一片 TDICCD 的第一个有效像元在垂直图像积分方向的偏离误差。

(2) 直线性要求。就单条直线而言, 第一行 TDICCD(奇数行)或第二行 TDICCD(偶数行)上像元偏离各自中心基准直线的直线度误差不能超过 1/3 像元, 即 $\Delta x \leq 3 \mu\text{m}$ 。

(3) 平行度要求。指第一行 TDICCD(奇数行)和第二行 TDICCD(偶数行)像元中心所形成的两条直线间的平行度误差。

(4) 共面性要求。所有的 TDICCD 器件的光敏面需在同一平面内, 且都应在光学系统的焦平面上, 也就是说必须保证所有的 TDICCD 的光敏面在光学系统的焦深范围内。

前三项精度要求主要是由导轨、显微镜、成像 CCD 相机等误差决定的, 第四项主要是由焦平面板的平面度来保证的^[2], 应将焦平面板的面形精度控制在 $5 \mu\text{m}$ 。

由于光学遥感器在运输、发射过程中承受冲击、振动、噪声等多种动载荷^[3]以及恶劣的在轨空间热环境的作用, 所以在设计中, 除了对焦平面板强度有要求外, 对其动静态刚度、热稳定性的要求也比较高, 其结构稳定程度将直接影响到 TDICCD 的成像质量, 最终制约空间遥感器的工程质量, 是遥感器设计中的关键。

选用高体份(55%~57%) SiC/Al 复合材料加工制成焦平面板。从高体份 SiC/Al 复合材料与传统的航天材料的性能比较、焦平面板的结构设计、力学模拟仿真、4℃温升模拟仿真、试验验证(正弦振动试验和高低温循环试验)等方面证明了应用于光学遥感器的焦平面板选用高体份 SiC/Al 复合材料是可行的, 可满足空间光学遥感器当前的应用需求。

1 焦平面板的材料选择

表 1 列出了几种常用的空间结构材料。经过比较发现, 高体份 SiC/Al 复合材料的密度与 Al 接近, 而弹性模量却比 45# 钢还要略高一些, 约为钛合金的 2 倍、Al 的 3 倍; 比模量高达 72.40, 是 Al、钛、钢、镁铝合金等金属结构材料的 3 倍; 导热系数高于镁铝合金; 热膨胀系数仅为 Al 的 1/3 左右, 比钛合金还低。同相对较为成熟的低体份(10%~20%) SiC/Al 复合材料相比, 它的功能特性也极为突出, 弹性模量、比刚度是低体份 SiC/Al 复合材料的 2 倍, 导热系数是低体份 SiC/Al 复合材料的 1.5 倍,

热膨胀系数仅为低体份 SiC/Al 复合材料的 1/2^[4]。因此, 选用高体份 SiC/Al 复合材料作为空间遥感器焦平面板的结构材料。

表 1 应用于空间光学遥感器的主要结构材料^[4,5]

序号	结构材料	密度 ρ /(g/cm ³)	弹性模量 E /GPa	比刚度 (E/ρ)	热膨胀系数 $\alpha/10^{-6}$ (K)	导热系数 λ /(W/m·K)
1	45# 钢	7.81	200.00	25.60	11.60	48.00
2	Al	2.70	68.00	25.19	22.50	167.00
3	TC4	4.40	114.00	25.91	9.10	7.40
4	镁铝合金	1.80	40.00	22.22	25.00	201.00
5	殷钢	8.90	141.00	15.84	0.65	13.70
6	低体份 SiC/Al	3.00	100.00	33.33	16.00	155.00
7	高体份 SiC/Al	2.94	213.00	72.40	8.00	235.00

2 焦平面板的结构设计

在焦平面板上双列交错放置 15 片 TDICCD, 考虑到 TDICCD 的数量, 交错拼接技术对 TDICCD 之间相对位置的要求, 以及焦平面板高刚度的结构要求, 确定焦平面板的外形尺寸为 700mm×100mm×50mm。其外形结构如图 1 所示。从图中可以看出, 在焦平面上去除了大量不必要的材料, 只保留了每一面 4mm 的壁厚, 并在两列 TDICCD 的中间位置和在同一列避开 TDICCD 的位置设置了 4mm 厚的加强筋, 这样既可满足轻量化的要求, 同时又兼顾了焦平面板的结构刚度。

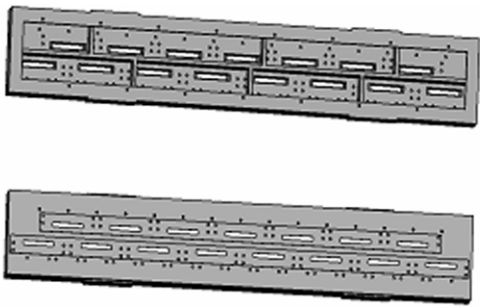


图 1 焦平面板结构图

3 模拟仿真

应用有限元分析软件 Hypermesh 进行网格划分; 施加约束, 约束焦平面板支撑架底面单元节点的 6 个自由度, 如图 2 所示; 定义表 1 中不同材料的属性; 负载荷; 进行 Z 向重力分析、模态分析、4℃温升模拟分析; 提交运算, 各种材料的组件运算结果如表 2 所示; 高体份 SiC/Al 复合材料分析运算结果如图 3~图 7 所示。

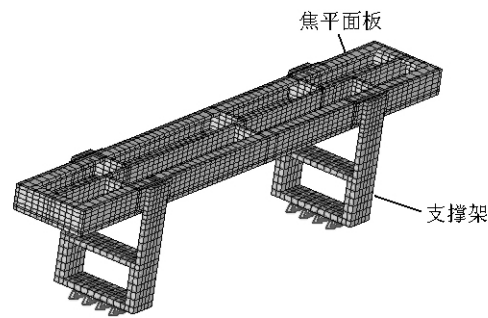


图 2 有限元模型及约束情况

4 焦平面板的材料制备与加工

目前,国内已经成功研制出高体份(55%~57%)SiC/Al 复合材料的工艺设备,以满足国内空间领域的迫切需求。采用无压浸渗专用工艺设备,在无需施加任何外压的情况下,在 800℃ 和氮气气氛下保温数小时,可实现 SiC 颗粒密堆积体与熔铝之间的高质量的无压浸渗复合,从而获得完整、致密的复合材料坯锭;采用线切割、电火花成型、平磨等特种加工手段将毛坯件最终制作、加工成形^[4],以得到相应的结构形式。

表 2 各种材料的组件分析和运算结果

序号	材料	重力变形/ 10^{-4} mm	1 阶模态/ 10^2	2 阶模态/ 10^2	3 阶模态/ 10^2	4℃ 变形/mm
1	高体份 SiC/Al	2.28	2.56	3.25	5.62	1.18×10^{-2}
2	低体份 SiC/Al	4.27	2.45	3.02	4.77	2.31×10^{-3}
3	Al	5.30	2.51	3.06	4.63	3.29×10^{-2}
4	TC4	5.60	2.06	2.56	4.10	1.29×10^{-2}
5	镁铝合金	5.59	2.91	3.49	5.01	3.66×10^{-2}
6	殷钢	9.47	1.49	1.87	3.06	4.03×10^{-2}
7	45# 钢	6.15	1.60	2.04	3.50	1.63×10^{-2}



图 3 焦平面板 1 阶模态 Y 向摆动

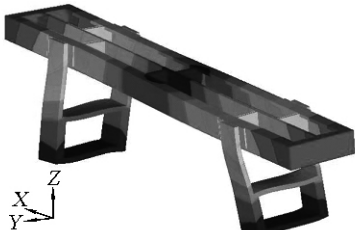


图 4 焦平面板 2 阶模态 Y 向摆动

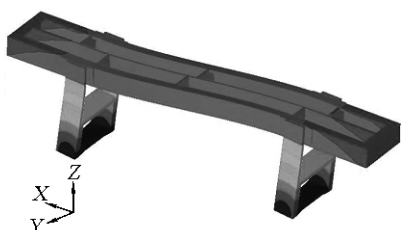


图 5 焦平面板 3 阶模态 X 向摆动

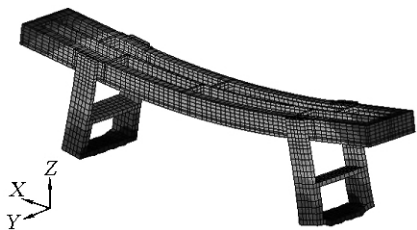


图 6 4℃ 温升分析运算结果

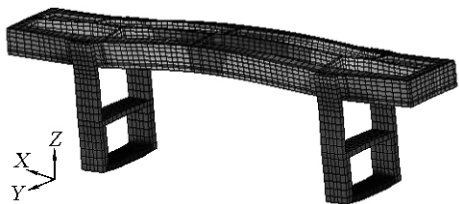


图 7 Z 向重力分析运算结果

5 试验验证

5.1 正弦振动试验

将安装焦平面板的支撑板与振动试验台联结,按照空间环境试验条件进行 X、Y、Z 三个方向的正弦振动试验,试验流程如图 8 所示。

在热真空试验、正弦振动试验前后,用电感测微仪对焦平面板面形下的表面进行面形检测,如图 9 所示。



图 8 试验流程图

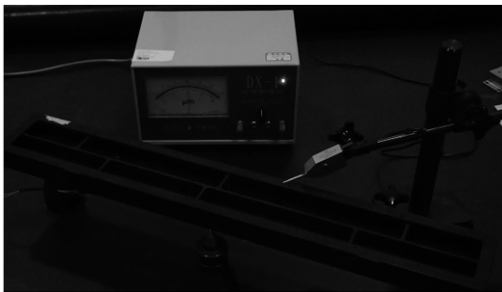


图 9 面形检测

5.2 热真空试验

将焦平面组件放入真空罐中进行高低温循环试验,以检验焦平面板抗热真空环境的能力。

试验条件:

环境压力: $\leq 1 \times 10^{-3}$ Pa

试验温度:高温 40℃,低温 4℃

循环次数:3 次

保持时间:每次循环在高温和低温各保持 12h。

5.3 面形检测

从面形检测结果(表 3)可以看出,焦平面板在热真空试验、正弦振动试验前后,面形无太大变化,说明该焦平面板的强度、刚度、热稳定性满足设计要求。

表 3 面形检查结果

检测时间	检测结果/ μm
热真空实验前	4
热真空试验后/正弦振动实验前	5
正弦振动实验后	4.5

6 结 论

高体份 SiC/Al 复合材料具有优异的结构性能,是空间光学遥感器结构件的理想材料,应用于焦平面板的加工是可行的。随着对空间光学遥感器设计要求的不断提高,高体份 SiC/Al 复合材料必将得到更广泛的应用,发挥更大的作用。

参考文献:

[1] 刘磊,高明辉. 空间大口径望远镜可展开式反射镜单元支撑技术[J]. 光学·精密工程,2005,13(3):127—134.
LIU L, GAO M H. Support technique of deployable unit mirror in space large aperture telescope[J]. Opt Precision Eng, 2005, 13(3):120—122. (in Chinese)

[2] 张星祥,任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接[J]. 光学学报,2006, 26(5):740—745.
Zhang Xingxiang, Ren Jianyue. Mechanical Interleaving Assembly of TDICCD Focal Plane[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5):740—745. (in Chinese)

[3] 陈长征,赵玲玲,刘磊,等. 空间遥感器支撑桁架的模态计算与试验[J]. 光学·精密工程,2007,15(8):1164—1169.
Chen Changzheng, Zhao Lingling, Liu Lei, et al. Modal Calculation And Test of Truss In Space Remote Sensor[J]. Opt Precision Eng, 2007, 15(8):1164—1169. (in Chinese)

[4] 崔岩,李丽富,李景林,等. 制备空间光机结构件的高体份 SiC/Al 复合材料[J]. 光学·精密工程,2007,15(8):1175—1180.
Cui Yan, Li Lifu, Li Jinglin, et al. High Volume Fraction SiC/Al Composites for Space-based Optomechanical Structures [J]. Opt Precision Eng, 2007, 15(8):1175—1180. (in Chinese)

[5] 任建岳,陈长征,何斌,等. SiC 和 SiC/Al 在 TMA 空间遥感器中的应用[J]. 光学·精密工程,2008,16(12):2537—2543.
Ren Jianyue, Chen Chanzheng, HE Bin, et al. Application of SiC And SiC/Al to TMA Optical Remote Sensor [J]. Opt Precision Eng, 2008, 16(12):2537—2543. (in Chinese)