

文章编号: 1672-8785(2015)11-0035-05

基于高体分 SiC_p/Al 材料的空间相机 主支撑结构研制

田富湘 何 欣

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学二部, 吉林 长春 130033)

摘 要: 作为空间相机光学元件的载体, 主支撑结构对于确保光学元件相对位置的长期准确稳定具有决定性作用。由于具有比刚度高、热稳定性好等优点, 高体分碳化硅颗粒增强铝基 (SiC_p/Al) 复合材料非常适用于航天光机结构。利用超声波钎焊技术可以解决高体分 SiC_p/Al 材料的焊接问题, 这为其在空间相机主支撑结构上的应用奠定了基础。介绍了一种基于高体分 SiC_p/Al 材料的某空间相机的主支撑结构。通过工程分析比较了同一主支撑结构分别采用 TC4 和高体分 SiC_p/Al 两种材料时的力学性能差异。结果表明, 采用高体分 SiC_p/Al 材料制成的主支撑结构在质量上轻了 31.8%, 在一阶频率上高了 25%。通过力热试验可知, 该主支撑结构在焊缝强度和尺寸稳定性等方面均满足使用要求。

关键词: 空间相机; 主支撑结构; 高体分铝基复合材料; 超声波钎焊

中图分类号: V447.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.11.007

Development of Welded Space Camera Supporting Structure Based on High Volume SiC_p/Al Composites

TIAN Fu-xiang, HE Xin

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

Abstract: As a carrier of the optical elements in a space camera, the main supporting structure of the space camera plays a decisive role in making the relative positions of optical elements accurate and stable for a long time. Because of the advantages of high specific stiffness and high thermal stability, high volume SiC_p/Al composites are very suitable for making opto-mechanical structures for space application. Since the ultrasonic-aided brazing technique can solve the welding problem of high volume SiC_p/Al composites, it has laid a foundation for the application of high volume SiC_p/Al composites in the main supporting structures of space cameras. A main supporting structure for a certain space camera based on high volume SiC_p/Al composites is presented. The mechanical properties of two similar main supporting structures made of TC4 and high volume SiC_p/Al composites respectively are analyzed. The results show that the weight of the main supporting structure made of high volume SiC_p/Al composites decreases by 31.8% and the first-order frequency increases by 25%. It is known in the mechanical and thermal tests that the main supporting structure meets the requirements in weld strength and size stability.

收稿日期: 2015-10-26

作者简介: 田富湘(1983-), 男, 福建大田人, 助理研究员, 硕士, 主要从事空间光学仪器的结构设计研究。

E-mail: tianfuxiang@foxmail.com

Key words: space camera; support structure; high volume SiC_p/Al composites; ultrasonic aided brazing

0 引言

作为光学元件的载体,主支撑结构是空间相机的重要组成部分。为了使相机具有良好的成像质量,主支撑结构需确保各个光学元件的相对位置长期准确、稳定^[1-5]。近年来,空间相机正朝着大视场、高分辨率的方向迅速发展,相机规模越来越大,主支撑结构的设计难度也越来越大。空间相机的主支撑结构主要可分为两类:一类是薄壁框架式结构,其一般采用加强筋与薄壁组合整体铸造成型,工艺成熟,稳定性好;另一类是桁架式结构,其结构简单,质量较轻^[2]。

SiC_p/Al材料是铝基复合材料中的一种,它由连续状的Al及Al合金与一定体积分数的SiC颗粒构成,兼具SiC和Al的优点。根据SiC颗粒所占体积分数的不同,SiC_p/Al材料可分为低体分SiC_p/Al材料、中体分SiC_p/Al材料和高体分SiC_p/Al材料三种^[6]。其中,高体分SiC_p/Al材料具有比刚度高、导热率高以及热膨胀系数小等优点,非常适用于航天光机结构。受材料制备工艺的限制,高体分SiC_p/Al坯料尺寸较小,所以只在空间相机的反射镜支撑结构等小型构件上有过应用^[7-8]。

高体分SiC_p/Al超声波钎焊的出现使得该材料在大型复杂构件上的应用变得更加容易。文献[9]采用超声波钎焊技术将高体分SiC_p/Al材料应用到了无人机载光电平台的内框架上。本文将介绍高体分SiC_p/Al材料在某空间相机主支撑结构中的应用,并通过工程分析比较分别采用高体分SiC_p/Al材料和TC4材料的主支撑结构在力学性能方面的差异。

1 主支撑结构的设计

本文研制的某空间相机主支撑结构的尺寸为1000 mm×850 mm×600 mm。对于这种尺寸规模的主支撑结构,采用薄壁框架式结构或桁架式结构均可满足要求。但相对说来,桁架式结构的装配工艺比较复杂,因此薄壁框架式结构在

这方面具有比较明显的优势。

1.1 设计原则

空间相机的主支撑结构是光学元件的主要载体,它不仅要确保光学性能良好、稳定,而且还要满足空间环境对结构的要求。同时,相机上的绝大部分功能组件都与其存在接口关系。主支撑结构设计的要求是按照一定的要求将光、机、电、热组合成具有某种功能的设备,并且必须保证设备在静态、动态以及规定的温度环境下均能满足总体性能要求。因此,空间相机的主支撑结构设计需要遵循以下几个原则:

- (1) 保证光学元件的间隔和光轴倾斜等误差处在光学设计许可的范围内;
- (2) 保证结构在承受规定载荷的状态下,具有足够高的强度;
- (3) 具有足够大的刚度,包括静态刚度和动态刚度,并尽量降低在共振频率下的动态响应;
- (4) 具有足够长的寿命,防止结构在力学环境条件下失效;
- (5) 具有良好的热性能,保证在一定的温度范围内拥有稳定的尺寸和形状;
- (6) 在满足上述条件的前提下,应尽量减轻结构重量,并使其具有良好的加工性能。

1.2 材料选择

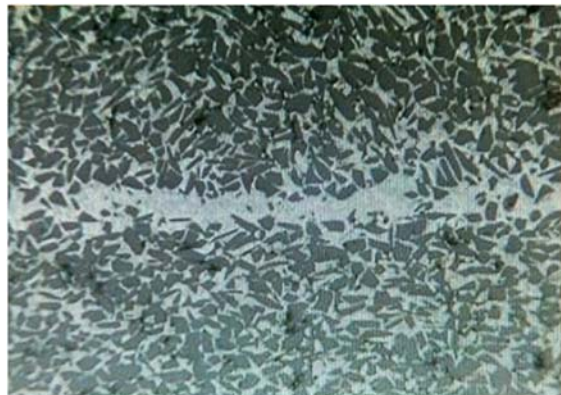
考虑到主支撑结构受重量和动、静态刚度的限制,所选材料需要具有较高的比刚度。另外,主支撑结构还需具有良好的热稳定性。从表1中可以看出,与铝合金、钛合金以及殷钢等航天常用结构材料相比,高体分铝基复合材料比刚度高、热稳定性好,具有明显优势。因此,主支撑结构采用高体分铝基复合材料。

1.3 超声波焊接技术

目前,高体分SiC_p/Al复合材料只能用于制作尺寸小于Φ1500 mm×120 mm的坯料。本文研制的某空间相机主支撑结构显然无法采用单块坯料进行加工成形,而需采用多件拼接而成。机械连接方法包括螺钉连接、胶接和焊接等。与螺钉连接和胶接相比,焊接具有刚度大、整体性好

表 1 航天常用光机结构材料的性能参数

材料名称	密度 ρ (g/cm ³)	弹性模量 E (Gpa)	比刚度 E/ρ (10 ⁶ m ² /s ²)	热胀系数 α 10 ⁻⁶ /K	导热率 λ (W/(m·K))	热稳定性 λ/α (10 ⁶ W/m)
铝合金 2A12	2.78	70	25.18	22.7	120	5.29
钛合金 TC4	4.40	114	25.91	8.9	6.8	0.76
殷钢	8.90	141	15.84	0.65	13.7	21.08
高体分 SiC _p /Al	2.94	179	60.88	8.0	148	18.50



(a)



(b)

图 1 焊缝的微观结构图

等优点。将传统的焊接方法直接应用在高体分铝基复合材料上的效果较差。而超声波辅助钎焊工艺既可以在大气条件下不使用钎剂去除铝合金表面的氧化膜,又可以促进 Zn-Al 合金对陶瓷的润湿作用^[9]。高体分铝基复合材料在超声波辅助下的钎焊性能良好。图 1 为钎焊焊缝的微观结构图。试验结果表明,该焊缝的强度与母材接近。

1.4 结构设计及实现

本文研制的某空间相机光学元件在空间分布上趋于前后两组的形式。根据这个特点,主支撑结构在设计上设有前框架和后框架。前后两组光学元件分别被安装在前框架和后框架上。前框架与后框架之间通过薄壁加强筋连接。图 2 所示为经过优化设计后的主支撑结构,其质量为 50.8 kg。

考虑到目前用高体分 SiC_p/Al 复合材料制备坯料时的尺寸限制,我们在设计中将主支撑结构拆分成了 7 个零件,分别为前框、左侧板、右侧板、底板、顶板、后框 1 以及后框 2,如图 3

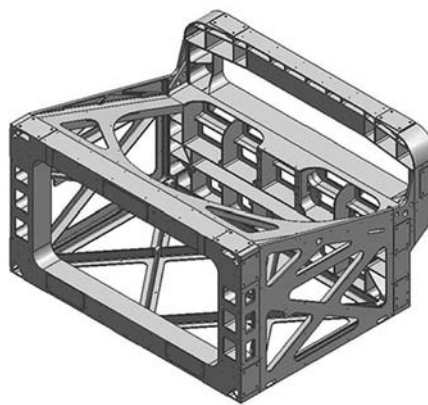


图 2 主支撑结构

所示。各个组成零件均采用薄壁加强筋结构,其壁厚为 4。

在各单件加工完成后,利用超声波钎焊技术将 7 个零件焊接成一个主支撑结构。在框架的加工过程中,切削量较大,且经过焊接,框架容易出现较大的切削和焊接应力。为了消除加工及焊接应力,我们在加工过程中对高体分 SiC_p/Al 复合材料进行了多道热处理。最后,采用 X 射线应力测定仪对残余应力进行了测量,以确保主支撑结构处于低残余应力状态。

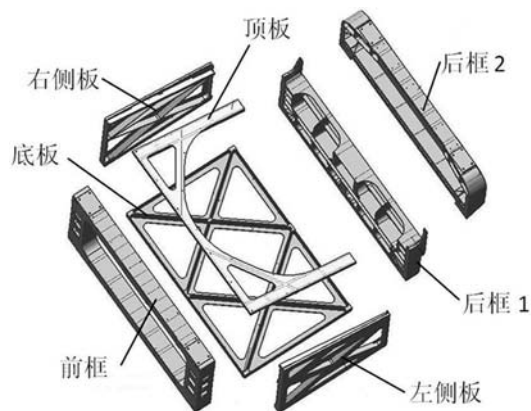


图 3 主支撑结构的拆分图

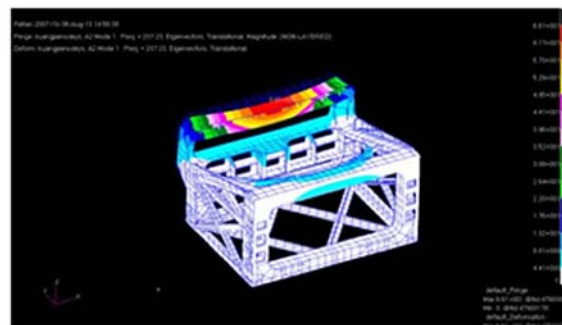
2 工程分析与试验验证

空间相机对光学元件的位置安装精度及稳定性要求非常高。作为光学元件的载体，主支撑结构需要具有良好的刚度。因此，我们十分有必要对主支撑结构的刚度进行分析，并依此对其进行优化设计。本文通过 Pantran 软件建立了有限元模型，然后采用六面体单元，并通过 Nastran 有限元分析软件对其进行了计算。图 4 所示为经模态分析后的主框架结构的前三阶振型。为了更加直观地比较高体分 SiC_p/Al 复合材料与 TC4 材料孰优孰劣，针对该主支撑结构分别赋予两种材料进行模态计算。计算结果表明，采用高体分 SiC_p/Al 复合材料制成的主支撑结构比采用钛合金材料时轻了 31.8%，并在一阶频率上高了 25%，如表 2 所示。

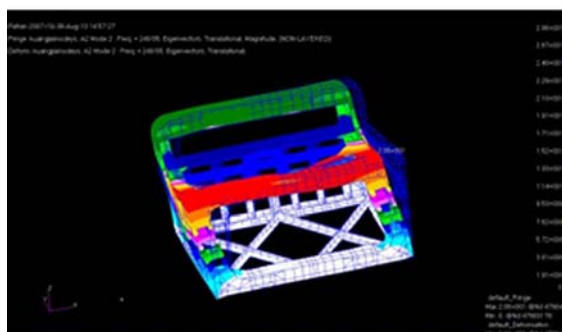
表 2 采用不同材料制成的主支撑结构的模态比较

	高体分 SiC_p/Al (Hz)	钛合金 (Hz)
一阶	237.23	189.78
二阶	249.55	203.26
三阶	323.18	272.49

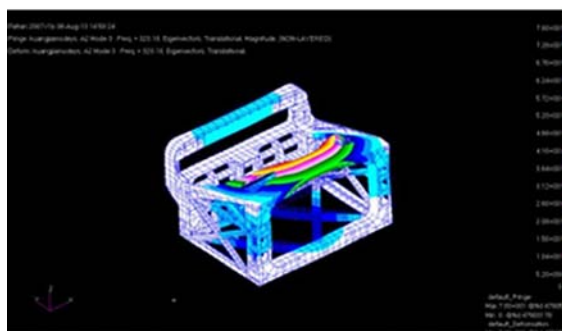
通过力学试验可知，采用高体分 SiC_p/Al 材料制成的主支撑结构的模态与计算值基本一致，其焊缝强度满足使用要求。力热试验结果表明，该主支撑结构的尺寸稳定性良好，满足空间相机的使用要求。



(a) 一阶振型图



(b) 二阶振型图



(c) 三阶振型图

图 4 采用高体分 SiC_p/Al 材料制成的主支撑结构的振型图

3 结束语

由于具有比刚度高、热稳定性好等优点，高体分 SiC_p/Al 复合材料是一种适用于航空航天光机结构的优良材料。本文采用高体分 SiC_p/Al 复合材料研制了某空间相机的主支撑结构。该主支撑结构由 7 个高体分 SiC_p/Al 复合材料零件通过超声波辅助钎焊焊接而成。通过工程分析可知，这种主支撑结构比采用传统 TC4 材料制成的主支撑结构轻了 31.8%，并在一阶频率上高了 25%。力热试验结果表明，该主支撑结构在焊接强度和尺寸稳定性等方面均满足使用要求。

参考文献

- [1] Yoder P R. Opto-mechanical Systems Design [M]. Washington: SPIE Press, 2005.
- [2] 卢威, 傅丹鹰, 陶家生. 基于有限元法的离轴 TMA 结构选型分析 [J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(2): 34-38.
- [3] 李畅, 何欣. 基于 Rayleigh 算法的空间相机桁架结构设计 with 优化 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2405-2409.
- [4] 张雷, 贾学志. 大型离轴三反相机桁架式主支撑结构的设计与优化. 光学精密工程, 2009, 17(3): 603-608.
- [5] 关英俊, 辛宏伟, 刘巨, 等. 空间相机主支撑结构优化设计方法的研究 [J]. 光学技术, 2006, 32(S1): 651-654.
- [6] 崔岩, 李丽富, 李景林, 等. 制备空间光机结构件的高体份 Si/Al 复合材料 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1175-1180.
- [7] 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.
- [8] 程志峰, 张葆, 崔岩, 等. 高体份 SiC/Al 复合材料在无人机载光电稳定平台中的应用 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2820-2827.
- [9] 张洋, 闫久春. 高体积分 SiC 颗粒增强铝基复合材料的超声波钎焊 [J]. 焊接, 2008, 15(8): 29-31.

(上接第 24 页)

- [9] 段瑞玲, 李庆祥, 李玉和. 图像边缘检测方法研究综述 [J]. 光学技术, 2005, 31(3): 415-419.
- [10] Majunathi B S, Ma W Y. Texture Features for Browsing and Retrieval of Image Data[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligent, 1996:837-842.
- [11] Haralick R M, Shangmugam K. Texture Feature for Image Classification[J]. IEEE Transaction on Systems, 1973, 3(6): 768-780.
- [12] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [13] 徐光辉, 程东旭, 黄如, 等. 基于 FPGA 的嵌入式开发与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [14] 张雅琦, 李锐, 等. Verilog HDL 高级数字设计[M], 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [15] 刘怡, 黄自立, 王经纬, 唐湘成. FPGA 双线性插值图像变换系统的设计与实现 [J]. 中国测试技术, 2008, 34(3): 65-67.

(上接第 35 页)

5 结束语

采用数字化全波型检波方法解决了激光扫描中的高速、高精度测距问题。该系统的主要测距误差为幅相误差、时刻鉴别误差和采样位置随机误差。根据测试数据对以上测距误差进行了分析, 并提出了误差抑制方法。最终通过该激光扫描器进行了实验验证。结果表明, 该激光扫描器能够满足交通数据采集的需求。

参考文献

- [1] Vincent D. High-resolution Eye Safe Time of Flight Laser Range Finding [C]. Proceedings of the SPIE, 2000, 4035:1-10.
- [2] 陈奔, 郭颖. 脉冲式高精度激光测距技术研究 [J]. 红外, 2010, 31(6):1-4.
- [3] 陈千颂, 杨成伟. 激光飞行时间测距关键技术进展 [J]. 激光与红外, 2002, 32(1):7-10.
- [4] 杨成伟, 霍玉晶. 基于 CPLD 的脉冲激光测距飞行时间测量 [J]. 激光与红外, 2004, 34(2):106-108.
- [5] 夏桂芬, 赵保军. 激光雷达的双门限检测技术研究 [J]. 激光与红外, 2005, 35(7):469-472.
- [6] 胡以华, 王建宇, 薛永祺. 机载激光遥感成像的激光回波波形数字化技术 [J]. 遥感学报, 2001, 5(2):110-113.
- [7] 姜燕冰, 严惠明, 王启明. APD 探测电路脉冲饱和现象及解决方法 [J]. 光学仪器, 2009, 31(2):44-47.