

文章编号: 1005-5630(2015)06-0513-04

高体积分数 SiC/Al 焊接结构应用于 空间相机的稳定性研究

刘晓丰, 何 欣, 张 凯

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 针对焊接工艺应用于高体积分数 SiC/Al 复合材料的成熟性研究了焊接工艺应用于航天遥感器机身结构的稳定性。根据光学设计公差分析结果和机身的结构形式, 提出了通过运用经纬仪和三坐标测量机测量角量和线量的验证原理, 论证了胶接工艺的可行性。对机身进行了热循环试验, 标定了实验前后各测点的角度以及距离, 对实验前后的数据进行了比较。结果表明, 机身最大转角俯仰方向为 $2.1''$, 方位方向为 $2.3''$, 机身三个方向的最大距离变化分别为 0.034 mm , 0.044 mm , 0.034 mm , 焊接工艺应用于高体积分数 SiC/Al 复合材料, 能够满足设计指标为转角小于 $5''$, 距离公差 $\pm 0.05\text{ mm}$ 的设计要求。

关键词: 高体积分数 SiC/Al 复合材料; 焊接; 稳定性

中图分类号: V 45 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.06.009

Resrarch on the stability of the high volume fraction SiC/Al composites frame welded structure applying in the space camera

LIU Xiaofeng, HE Xin, ZHANG Kai

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

Abstract: As for the immaturity of the weld technology applied to the high volume fraction SiC/Al composites, the stability of the space remote sensor skeleton construction was studied. According to the findings of the tolerance analysis of optical deign and structures, the verification of measuring angle and linearity using three-coordinate measuring machine and theodolite was proposed. The feasibility of cementing technology was demonstrated. By the thermal cycling test of frame, the angel and the distance of measuring point were calibrate. The calibrated data was compared. The results show that the torsional angel of the frame is $2.1''$ in pitch, $2.3''$ in azimuth, and the changes of the distance in the three directions are 0.034 mm , 0.044 mm and 0.034 mm , which can meet the technical requirements of torsional angel smaller than $5''$ and the distance tolerance of $\pm 0.05\text{ mm}$.

Keywords: high volume fraction SiC/Al compound material; welding; stability

引 言

在空间对地遥感领域, 为了提高空间遥感相机等大型光学遥感系统的分辨率, 通常采用长焦距和大

收稿日期: 2015-06-11

基金项目: 中国科学院三期创新工程资助项目(074Z3JN70)

作者简介: 刘晓丰(1984—), 男, 硕士, 主要从事空间光学遥感器结构设计的研究。E-mail: liuxiaofengshen@163.com

相对孔径的全反式或折反式光学系统^[1-3]。

高分辨率离轴反射式光学系统具有大口径、长焦距、大视场和结构非对称等特点,使得离轴反射式光机系统相机机身尺寸较大,给结构设计带来了很大的困难^[4]。受尺寸和质量的制约,寻求高比刚度、低线胀系数的材料已成为迫切需求。高体积分数 SiC 铝基增强复合材料具有高比强度、高尺寸稳定性、低膨胀系数优异的综合性能,在常用的空间结构应用材料中,高体积分数 SiC/Al 复合材料的综合品质因数最好^[5-6],因此在空间相机机身设计中得到了广泛应用。

基于高体积分数 SiC/Al 复合材料的优越的机械性能以及优良的物理性能,某航天相机光机系统的主支撑结构的材料采用了高体积分数 SiC/Al 复合材料,光学系统是四反结构形式的新型超大视场离轴光学系统,相机机身由若干件高体积分数 SiC/Al 材料构件焊接而成。目前采用该材料并按此工艺研制的相机机身在航天项目上还未有成功应用的先例。考虑到机身的加工工艺,单框加工切屑量大,组合焊接次数多,焊接过程的加热和冷却循环过程和异种材料热膨胀系数的差异等诸多因素必然会导致残余应力的产生,而残余应力往往是造成结构最终破坏的主要原因^[7]。因此,必须对机身的尺寸稳定性进行充分验证,以满足相机成像要求。

1 相机机身的结构形式

主体机身的外形尺寸为 950 mm×700 mm×650 mm,相机主机身体的三维模型如图 1 所示。

主框架拆分成 4 个零件,分别为前框、后框、左侧板和右侧板。各组成零件均设计成薄壁加强筋结构,在各单件加工时,由于直接采用锻料进行加工,切削量比较大,需进行多次热处理消除切削应力。在各单件加工完成后,将各个零件通过焊接组合成一个整体。主框架拆分成 4 个零件,分别为前框、后框、左侧板和右侧板。各组成零件均设计成薄壁加强筋结构,在各单件加工时,由于直接采用锻料进行加工,切削量比较大,需进行多次热处理消除切削应力。在各单件加工完成后,将各个零件通过焊接组合成一个整体。

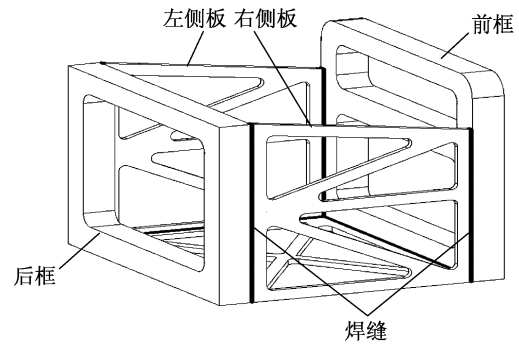


图 1 主框架体

Fig. 1 The main frame

2 机体残余应力分析

机身的各框采用的材料为高体积分数碳化硅增强铝基复合材料,焊料为铝合金,焊接工序由哈尔滨工业大学焊接技术与工程系完成。机身结构在焊后经过若干次温度时效和振动时效,可以有效的减少残余应力。时效后用 X 光衍射法测机身上焊缝附近的残余应力。焊接残余应力测量平均差值如表 1 所示。

材料的变形公式以及转角公式为

$$\begin{cases} \Delta l = \frac{\sigma_i l}{E} \\ \Delta \theta = \frac{\Delta l_1 - \Delta l_2}{l} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_i 为应力; Δl 为应力引起的形变量; E 为弹性模量; $\Delta \theta$ 为两个平面两端形变变化引起的转角。

由上述公式计算结果得:前框和后框的形变为 0.012 mm,转角为 1.5";左框和右框的形变为 0.002 mm,转角为 1.8"。满足光学设计 $\delta_{\max} = 5''$,距离 $\Delta_{\max} = 0.05$ mm 的要求。

表 1 测点残余应力

Tab. 1 The residual stress of the metrical point

被焊件	横向残余应力/MPa	纵向残余应力/MPa
左框—前框	32.2	-26.1
左框—后框	-45.5	-44.0
右框—前框	42.8	34.7
右框—后框	31.1	-27.6
左框—底框	-45.9	19.4
右框—底框	21.3	41.9

3 机身结构的稳定性验证

在相机机身主要位置如焊缝附近、反射镜连接面边缘等处贴上小平面对镜。光学环氧胶完全固化后,按照上述原理和方法对小平面对镜间的相对转角以及角点距离进行了一次测量,然后进行了热循环试验,试验条件按照相机方案设计给出的指标,热循环试验后,稳定一段时间后,再进行一次转角和距离的测量,把试验前后的两次结果进行比较,得出试验前后小平面对镜间的角度和距离变化。多次试验后,通过比较小平面对镜间夹角和角点距离的变化来评价机身上相应的点的变化情况,以说明机身的稳定性。

3.1 验证原理

对于角度的验证,在框架的各个部分贴上若干小平面对镜,使用的胶为光学环氧树脂胶。通过检测试验前后小平面对镜的转角的变化来推出框架上贴小平面对镜的相应的点的变形情况。检测转角的检测设备使用两台 0.5 s 莱卡经纬仪。前后框和侧框的检验原理如图 2 和图 3 所示。

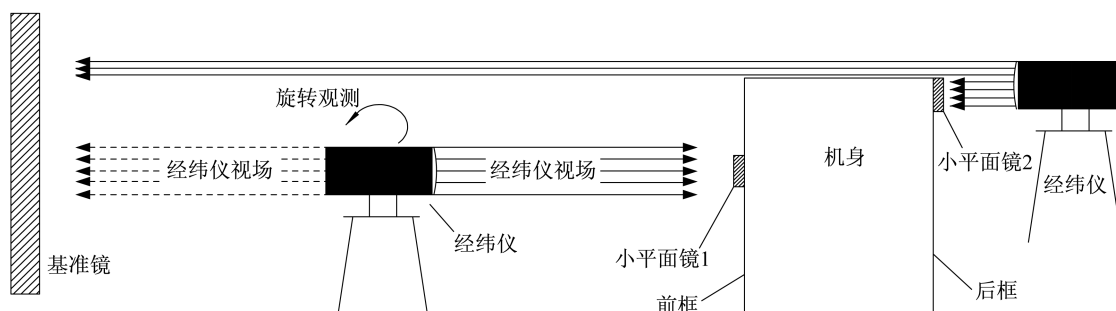


图 2 前后框的检测原理

Fig. 2 The measurement principle of front frame

对于线量的检测,光学系统中各反射镜的的公差要求为 $\Delta = \pm 0.05 \text{ mm}$ 。相机在经历若干次试验后反射镜相对位置变化必须处在给定的公差带内,验证机身在三个方向的尺寸稳定性使用的检测工具是三坐标测量机。

3.2 胶接工艺的可行性论证

检测方法的可行性是保证检测过程有意义以及检测结果具有高可信度的前提。在机身验证的过程中,考虑到热试验可能引起胶的流动引起不稳定的因素,以及温度引起小平面对镜变形,所以对胶接工艺进行了可行性论证。为验证光学环氧树脂胶的稳定性做的试验工装如图 4 所示。小平面对镜直径为 25 mm,小平面对镜用光学环氧树脂胶粘在镜座上,基准镜用螺钉固定在镜座上。胶完全固化后,把镜座放在热循环试验箱中进行试验,试验温度为 $-10 \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$,实验前后分别测量小平面对镜和基准镜之间的夹角,如表 2 所示。

由于基准镜用螺钉固定,受温度的影响非常小,可以忽略。实验结果表明,热循环实验前后,由光学环氧树脂胶引起的小平面对镜转角变化最大为 $0.5''$,可以认为光学环氧树脂胶应用于 $\Phi 25$ 口径、厚度 10 mm 小平面对镜是稳定的。

4 验证结果

对机身进行了 4 次试验,周期为 6 个月,试验完成后对实验数据进行了整理。机身上总共有 13 个小平面对镜。俯仰和方位角的相对变化如图 5 所示。

4 次实验前后,俯仰方向转角的变化 $\Delta\theta = 2.1''$,方位方向转角的变化 $\Delta\varphi = 2.3''$,满足单框的最大转角 $\delta_{\max} < 5''$ 的设计要求。

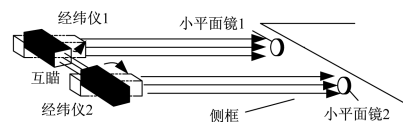


图 3 侧框的检测原理

Fig. 3 The measurement principle of back frame



图 4 胶稳定性试验图

Fig. 4 The figure of adhesive stability

表 2 胶稳定性验证数据

Tab. 2 The test data of adhesive stability

转角	试验前	试验后	变化量
绕 X 轴	22'49.4"	22'49.7"	0.3"
绕 Y 轴	3'10.0"	3'9.5"	0.5"

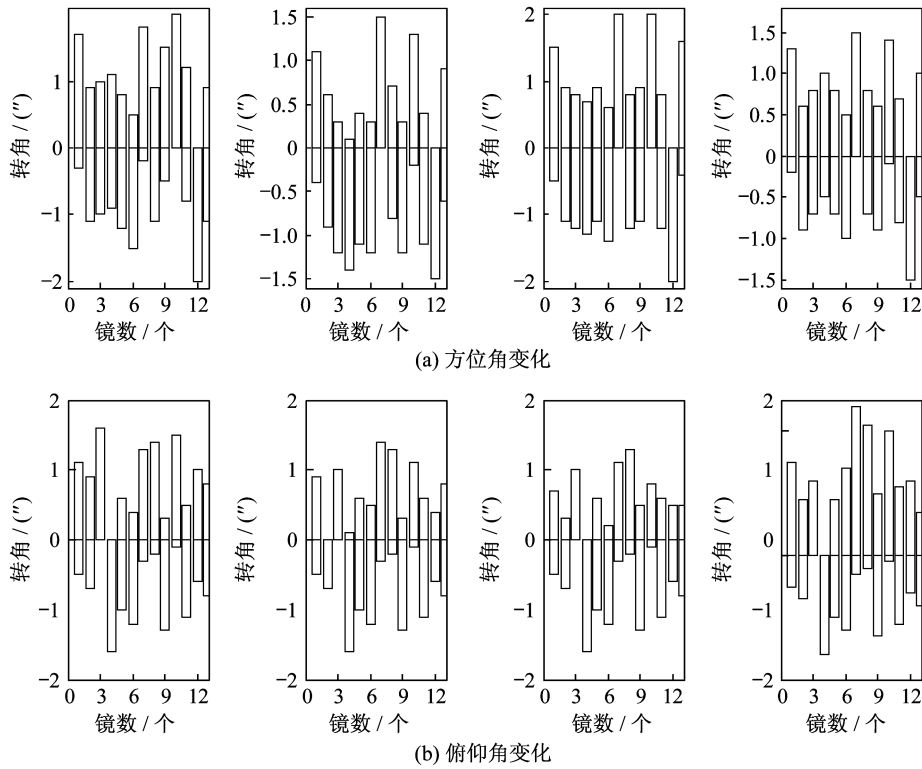


图 5 转角变化

Fig. 5 The change of angel

机身上布有 19 个测点, 两两之间的距离变化如图 6 所示。机身上测点距离的变化 $\Delta X_{\max} = 0.034 \text{ mm}$, $\Delta Y_{\min} = 0.044 \text{ mm}$, $\Delta Z_{\max} = 0.034 \text{ mm}$, 满足前后框距离的公差 $\Delta = \pm 0.05 \text{ mm}$ 的设计要求。

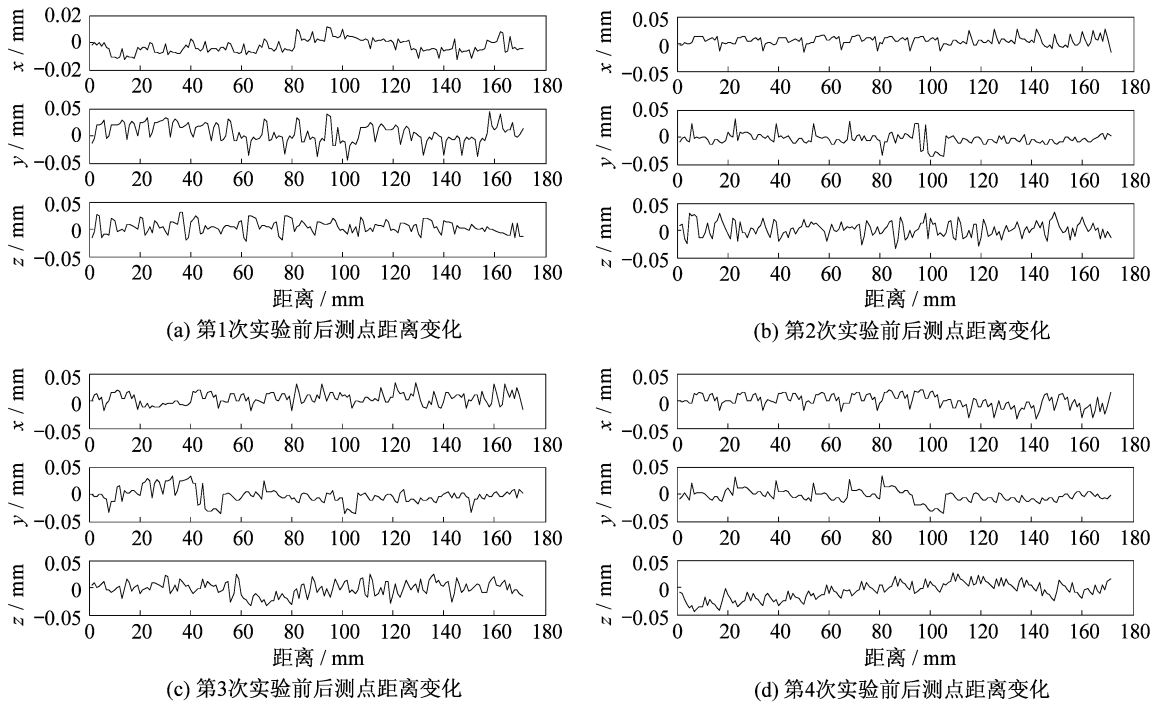


图 6 实验前后测点距离变化

Fig. 6 The change of the before-and-after test data

表 1 仪器测试结果对比
Tab.1 Contrast of instrument test results

	标称值/%	1	2	3	4	5	10	20	30	40	50
测 试 值	DMS910/%	0.9	1.7	2.7	3.7	4.5	9.4	18.4	28.7	39.4	50.7
	QYF01/%	0.9	1.9	3.0	3.7	4.7	10.1	19.8	30.4	40.5	51.2
	标称值/%	60	70	80	90	95	96	97	98	99	
测 试 值	DMS910/%	65.2	74.2	83.2	91.5	95.6	97.1	97.4	98.6	99.3	
	QYF01/%	59.9	70.9	79.8	90.8	95.3	96.6	97.3	98.5	99.3	

参考文献:

[1] 谢凤英,赵丹培,姜志国 Visual C++数字图像处理[M].北京:电子工业出版社,2008:7-16.
 [2] 刘浩学.印刷网点面积的测量与计算[J].北京印刷学院学报,2000,8(4):8-13.
 [3] 胡涛,付兆敏,吴学毅.基于数字图像的彩色印品网店面积检测装置的研究[J].印刷杂志,2003,10:56-58.
 [4] 程开富.CMOS 图象传感器的原理及应用[J].半导体情报,2001.38(5):5-9.
 [5] 陈锋.基于 Blackfin DSP 的数字图像处理[M].北京:电子工业出版社,2009.
 [6] 李松松,瑚琦,章慧毅,等.基于数字图像处理方法的印刷网点测量系统设计[J].光学仪器,2009,31(5):42-47.

(编辑:张 磊)

(上接第 516 页)

5 结 论

针对焊接工艺应用于大尺寸离轴三反相机存在焊接应力和残余应力较大的问题,本文提出了验证相机机身尺寸稳定性的一种方法;并对各检测环节的精度进行了系统的论证;验证结果表明,对于本文中的机身结构,材料采用高体分铝基复合材料,连接工艺采用焊接的形式,能够满足设计指标为转角 $<5''$,距离 $<0.05\text{ mm}$ 的设计要求。

采用本文的检测方法,可以对大尺寸航天遥感器机身的尺寸稳定性进行验证。焊接工艺应用于高体分铝基复合材料的结构件连接中,焊接构件的尺寸稳定性能够得到保证,该种工艺形式能够为高体分铝基复合材料应用于大型航天遥感器的结构设计中得到推广。

参考文献:

[1] 陈维春,王海星.大型三反离轴相机热控设计及在轨飞行验证[J].光学仪器,2015,37(2):116-121,131.
 [2] 杨会生,张银鹤,柴方茂,等.离轴三反空间相机调焦机构设计[J].光学精密工程,2013,21(4):948-954.
 [3] 郭疆,邵明东,王国良,等.空间遥感相机碳纤维机身结构设计[J].光学精密工程,2012,20(3):571-578.
 [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[J].光学精密工程,2009,17(3):603-608.
 [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.
 [6] 沙巍,陈长征,许艳军,等.离轴三反空间相机主三镜共基准一体化结构[J].光学精密工程,2015,23(6):1612-1619.
 [7] 程军.SiC/Al 板的焊接残余应力分析[J].力学季刊,2011,32(1):117-123.

(编辑:张 磊)