

文章编号: 1672-8785(2015)10-0009-05

硅铝合金焊接结构在空间相机中的应用

张 凯 何 欣 王忠善 刘晓丰

(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: 作为空间相机的一个关键部件, 机身结构对保证相机正常工作至关重要。按照光学设计和卫星的要求, 完成了机身结构的设计工作, 选择高体份硅铝合金材料生产机身, 选择焊接方式成型机身。通过有限元分析, 计算了机身的静态和动态力学性能, 证明了机身结构设计的合理性。计算了焊接应力的大小, 证明焊接应力不会影响到机身结构的稳定性。最后, 对机身结构进行了力学和热学试验, 验证了机身的力学性能和稳定性。结果证明, 高分辨率空间光学相机的机身结构可以使用高体份硅铝合金以焊接方式制造。

关键词: 空间相机; 结构设计; 铝基复合材料; 钎焊; 焊接应力

中图分类号: TH745 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.10.003

Application of Silicon-aluminum Alloy Welding Technology in Space Camera

ZHANG Kai, HE Xin, WANG Zhong-shan, LIU Xiao-feng

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

Abstract: As a key part of a space camera, the camera body structure is very important to the normal operation of the camera. According to the requirements in the aspects of optical design and satellite, the body structure of a space camera is designed. The body structure is made of silicon-aluminum alloy and its configuration is completed by welding. Through finite element analysis, the static and dynamic mechanical properties of the camera body are calculated and the reasonability of the body structure is verified. The welding stress is calculated and the calculation result shows that the welding stress can not affect the stability of the body structure. Finally, the mechanical and thermal experiments are made on the body structure. Its mechanical properties and stability are verified. The results show that the body structure of the high-resolution space optical camera can be made of silicon-aluminum alloy by welding.

Key words: space camera; structural design; silicon-aluminum alloy; brazing; welding stress

0 引言

随着信息技术的迅速发展, 现代社会对空

间遥感相机的重视程度越来越高。在我国, 遥感相机经过多年的发展, 已经形成了自己的系列。

遥感相机是应用卫星的功能子系统, 用于直接

收稿日期: 2015-09-12

作者简介: 张凯 (1981-), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事机械结构设计、机械制造以及系统装调等方面的研究。E-mail: zhangkaihai@sohu.com

完成特定的航天任务,在对地观测、气象预报和国防建设中有着极其重要的用途。

机身结构是遥感相机的重要组成部分,是保证成像质量的关键。在整个工作寿命期间,机身结构要经历火箭发射和入轨时的振动、冲击、噪声和加速度的影响,在轨运行期间还要经受真空、高低温、微重力和高能粒子辐射等空间环境的考验。所以机身结构作为遥感相机光学、电子学部件的承载基础,需要具有足够的动、静态力学性能和结构稳定性^[1]。

1 设计要求

遥感相机机身结构的具体设计要求和需满足的功能如下:

- (1) 满足构型与内部布局要求,根据总体设计和光学设计的结果进行设计;
- (2) 符合总体分配的重量指标要求;
- (3) 满足卫星的工作寿命要求;
- (4) 满足结构强度、刚度和稳定性要求,能够在力学、热学和空间环境下保证精度;
- (5) 满足机身与光学单元、检测单元、控制单元和卫星舱板等的物理接口要求;
- (6) 满足相机抑制杂光的要求。

按照总体性能指标的要求,相机光学系统的设计结果如图 1 所示。焦距为 5000 mm,主镜的口径为 500 mm。根据光学系统设计,确定机身外形的尺寸为 1050 mm×930 mm×750 mm。总体技术指标分解到机身部分的重量要求为不大于 50 kg。相机的在轨使用寿命为 8 年。

对于机身强度,主要通过有限元分析,计算出最大应力值和安全裕度,以确定是否满足许用要求。对于机身刚度,主要通过一阶谐振频率来衡量,频率越高,则刚度越大。相机正弦力学试验条件为 0 Hz~100 Hz,为防止机身在试验过程中产生共振,出现结构破坏,机身的一阶谐振频率要大于试验频率的 $\sqrt{2}$ 倍,即大于 140 Hz^[2]。

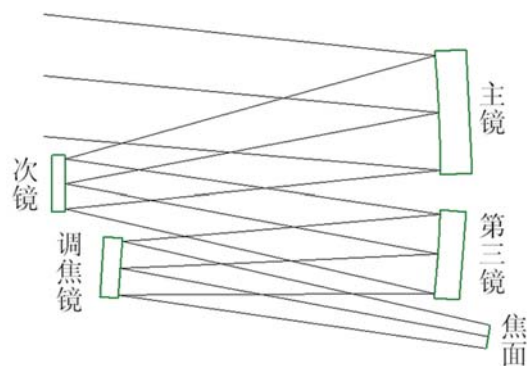


图 1 相机光学系统设计

2 材料选择

航天领域经常使用的结构材料主要有金属材料和非金属材料两种。金属材料包括铝合金、钛合金和镁合金等。非金属材料包括碳纤维复合材料和玻璃钢等^[3]。常用材料的性能参数见表 1。

机身结构对重量、强度、刚度和稳定性的要求都非常严格,对材料的比刚度和热特性的要求较高。钛合金密度较高,镁合金力学性能较差,不适合应用于本文中的机身结构^[4]。空间环境中的高能粒子辐射会侵蚀碳纤维材料的树脂基体,造成力学性能下降。相对于 8 年的在轨运行时间,将碳纤维材料大量应用于主承力结构会存在一定风险。综合考虑的结果是,铝合金材料尤其是铝基复合材料是较好的选择。

机身结构计划采用高体积份数的硅铝合金(以下简称高体份)材料制造,是一种 SiC 增强颗粒与铝合金基体的复合材料, SiC 颗粒的体积份数约占 55%,采用熔融无压浸渗工艺制造。高体份材料的比刚度(E/ρ)高、导热率高、热畸变小,既有优异的力学特性又有良好的热特性。不受空间环境的影响,寿命长、可靠性高。而且在航天领域有过成功应用的先例。

高体份材料的缺点是:断裂特性表明材料属于脆性材料,延展率低,对应力集中敏感,不耐冲击载荷。材料拉伸试验的曲线如图 2 所示。

高体份材料作为反射镜背板、焦面基板等小型、低负载结构,已经在多个空间型号任务

中使用过。但是, 作为脆性材料在主承力结构中大量使用, 在高分辨率空间光学相机中尚属首次。使用时需要依靠合理的结构设计, 将集中载荷尽量分散为均布载荷, 将冲击载荷与机身结构隔离; 通过有限元分析, 对关键部位进行优化设计, 增加安全裕度以满足要求。

因制造工艺不能铸造出高体份材料, 目前

国内仅能生产 140 mm 厚的板材。所以若要制造大型复杂的结构, 需要采用焊接工艺。焊接工序由哈工大焊接系采用超声波钎焊技术完成。焊接接头的力学性能是母材的 85% 以上。可以多次焊接, 焊接温度分别为 390 °C、430 °C 和 475 °C。焊料厚度约为 0.5 mm。

表 1 空间常用材料性能表

材料名称	钛合金	镁合金	铝合金	高体份	碳纤维
密度 ρ (g/cm ³)	4.44	1.81	2.78	2.94	1.56
弹性模量 E(GPa)	109	42	70	210	120
拉伸强度 σ_b (MPa)	877	300	410	420	
导热率 λ (W/m·K)	6.8	77.4	120	220	35
线胀系数 α (10 ⁻⁶ /K)	9.1	26.8	22.7	8.1	0.1

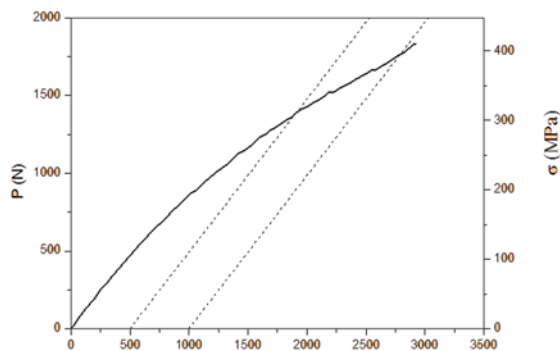


图 2 高体份材料应力-应变曲线图

3 结构设计

总体设计和光学设计决定了相机主要部件都分布在机身前后两端。前端包括次镜组件、调焦镜组件、调焦机构和指向镜组件, 重约 30 kg。后端包括主镜组件、第三镜组件、焦平面组件、驱动与视频处理电器箱和 3 个星敏感器等, 重约 85 kg。

机身结构在设计时拆分成了 6 个板型零件, 分别为前框架、后框架、左侧板、右侧板、底板和中间隔板, 其爆炸图如图 3 所示。力学性能较好的前、后框架作为相机所有部件的载体, 保证连接稳固, 其余 4 个板件用以保持两个框架的

相对位置。6 个零件焊接成一个相对封闭的结构, 以获得较高的力学性能。

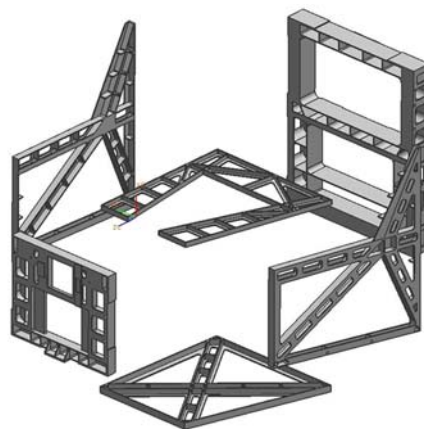


图 3 机身结构爆炸图

机身零件设计成薄壁加筋结构, 壁厚为 4 mm。加强筋可以保证薄壁壳体不失稳, 提高结构的力学性能^[5]。轻量化结构设计为翻边半开放形式, 以平衡焊接面积、结构刚度和轻量化率之间的关系。因此轻量化孔需要用“T”型刀具以侧刃加工。加强筋主要设计为纵横形式, 可以有效减少“T”型刀具加工不到的区域, 提高轻量化率。在焊接完成后, 通过组合加工保证连接表面的精度。机身结构经优化设计后, 质量为 48 kg, 满足重量指标的要求。

4 计算分析

4.1 静力学分析

材料焊接时的高温在冷却时会产生很大的焊接应力。焊接应力在相当长的时间内能使机身结构产生蠕变,从而影响光学系统的精度。焊接应力的大小除用 X 光衍射法测定外,还可以按照增量原理和虚功原理求解,公式为

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\} - \{C\}dT \quad (1)$$

式中, $\{d\sigma\}$ 为应力增量, $[D]$ 为弹塑性矩阵, $\{C\}$ 为材料性能矩阵。式 (1) 按弹性模型计算,焊接应力可近似求解:

$$B_c = \frac{\Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot E_m \cdot E_c \cdot t_m}{(1-\mu)(t_m \cdot E_m + t_c \cdot E_c)} \quad (2)$$

式中, B_c 为焊接应力, $\Delta\alpha$ 为线胀系数差值, ΔT 为焊接温度差值, E 为弹性模量, μ 为泊松比, t 为材料厚度, c 、 m 分别表示两种材料^[6]。

被焊接件同为高体份材料,焊料为铝合金,两种材料性能接近,焊接时将零件加热到 300 °C。由式 (2) 计算得到焊接应力为 75 MPa。机身结构在焊后还需经过数次振动时效和温度时效处理,预计可以将残余应力减小 60%~70%,剩余约为 30 MPa。可以满足静力学要求。

经工程分析,在 10 g 过载的情况下,机身的最大应力为 13 MPa,材料的强度极限 σ_b 为 410

MPa,安全系数为 12.4,满足静力学设计要求^[7]。

4.2 动力学分析

经有限元分析,机身结构无负载情况下前三阶谐振频率分别为 216 Hz、326 Hz 和 366 Hz,大于 140 Hz,满足动力学设计要求。机身前三阶模态如图 4 所示^[8]。

5 环境试验

机身结构的力学特性是否与设计和计算相符,需要通过力学和热学试验来验证。同时,通过试验也可以检验残余焊接应力大小是否满足要求。

5.1 力学试验

力学试验可以检测机身的固有频率,并释放部分加工和焊接应力,机身随机振动的试验条件见表 2。

试验结果为,机身结构在无负载情况下一阶谐振频率为 198 HZ,试验前后频率特性未发生变化,与有限元分析数据吻合较好。

5.2 热学试验

热学试验可以模拟空间环境,并通过温度变化释放部分加工和焊接应力。热学试验条件为真空度小于 1.3×10^{-3} Pa,试验温度流程如图 5 所示。

力学和热学试验结果为,机身结构变形约为 2 秒转角,小于光学设计的 10 秒转角要求,说明试验使机身残余的加工和焊接应力得以释

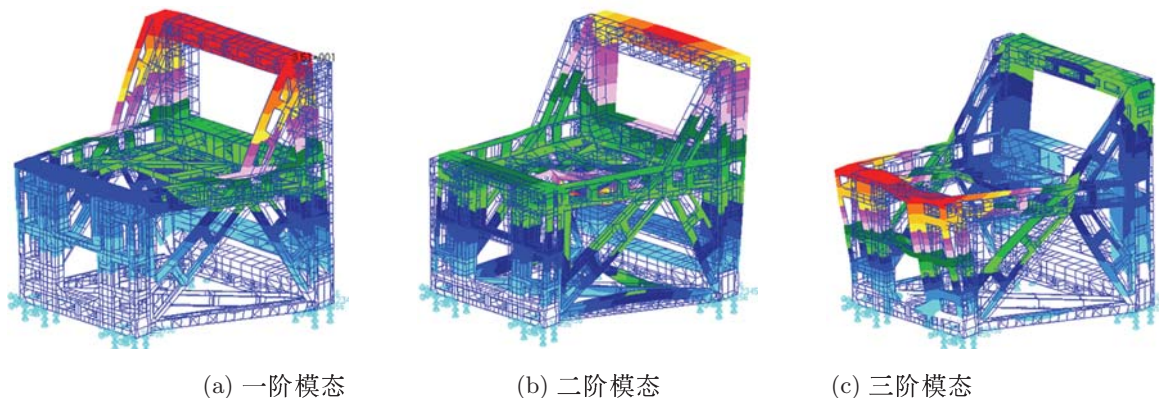


图 4 机身模态图

表 2 随机振动条件

Range of frequency(Hz)	2g acceleration	4g acceleration
20~100	3dB/oct	3dB/oct
100~600	0.005 g ² /Hz	0.005 g ² /Hz
600~2000	-9dB/oct	-9dB/oct
RMS	2 grms	4 grms
duration	300	120

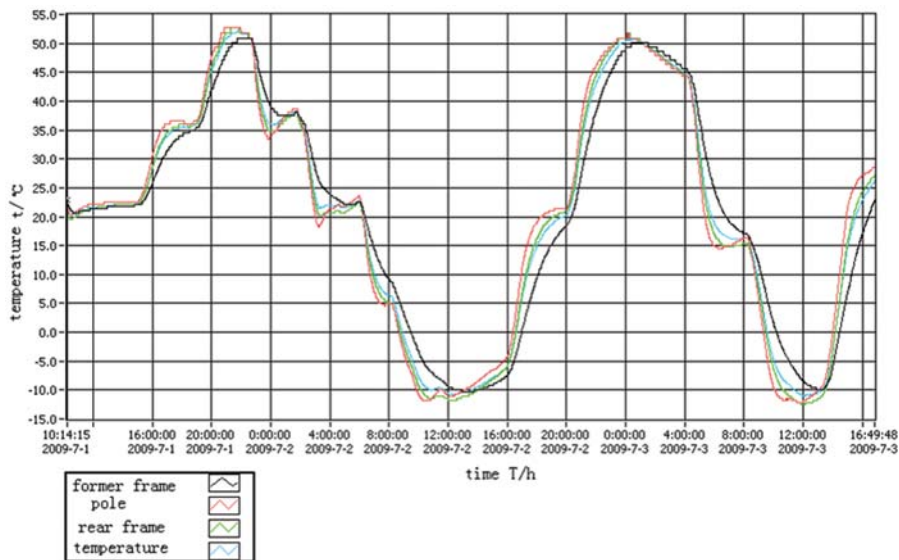


图 5 热真空循环监测点的温度曲线图

放。结构变形量满足使用要求,此时机身可以作为稳定的基础开始光学系统的装配工作。

6 结论

按照总体设计和光学设计对机身结构的要求,选择了高体份硅铝合金制造机身。根据材料的特性,确定了焊接工艺为机身结构的成型方式。

通过有限元法计算出机身结构的静态和动态力学性能,这些性能均满足设计要求。计算了焊接应力的大小,确定其不会影响机身的稳定性。最后对机身结构的力学特性和稳定性进行了试验验证。

试验结果表明,依靠合理的结构设计,高体份硅铝合金这种脆性材料,也可以用于制造相机的主承力结构。只要有适当的焊接工艺和时效处理方法,焊接应力可以控制在允许范围内。所

以,高分辨率空间光学相机的机身结构可以使用高体份硅铝合金焊接工艺来制造。

参考文献

- [1] 卢秉恒. 机械制造技术基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] 孙恒, 陈作模, 葛文杰. 机械原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 姚骏. 蜂窝夹层结构承力筒在 FY-3 卫星上的应用 [J]. 上海航天, 2004, 21(1): 52-57.
- [4] 苗健宇, 张立平, 吴清文, 等. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1649-1653.
- [5] 李士猛, 张蓉竹. 支撑面积对薄镜面形影响的研究 [J]. 红外与激光工程, 2009, 31(38): 82-86.
- [6] 雷永平, 韩丰娟, 夏志东, 等. 陶瓷-金属钎焊接头残余应力的数值分析 [J]. 焊接学报, 2003, 5(24): 33-37.
- [7] 董冰, 俞信, 张晓芳, 等. 分块式空间望远镜的光机热集成分析 [J]. 红外与激光工程, 2009, 2(38): 326-329.
- [8] 刘雍, 张朋军, 孙丽巍, 等. 空间相机结构件的振动试验仿真 [J]. 计算机辅助工程, 2006, 9(15): 367-369.