

SiC/Al 复合材料在机载光电稳定平台中的应用

程志峰^{1,2}, 张葆¹, 王平¹, 李明¹, 李延伟^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 采用无压浸渗复合新方法, 用高体份(55% ~ 57%)SiC/Al 复合材料制备了机载光电稳定平台内有效载荷的主承力框架。并对其微观结构特征、基本的力学及热物理性能予以表征。由于该材料优异的结构承载功能及卓越的热控功能, 利用有限元分析工具并结合试验研究表明: 相较于常用的铝合金材料, 整个内框架最大变形量减少了65%以上, 基频提升了70%, 取得了显著的轻量化效果并改善了结构动态响应。检测结果表明: 系统的稳定精度达到20 μ rad。经外场试飞考核, 系统性能稳定可靠。成功地将 SiC/Al 复合材料应用于机载光电稳定平台, 为航空新材料的应用做出了有效的探索。

关键词: SiC/Al 复合材料; 机载光电稳定平台; 内框架

中图分类号: V447.3; V254

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870(2011)01-0130-04

Application of SiC/Al Composites in Airborne Photoelectric Stable Platform

CHENG Zhifeng^{1,2}, ZHANG Bao¹, WANG Ping¹, Li Ming¹, LI Yanwei^{1,2}

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

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: The inner frame of the unmanned airborne optoelectronic stabilization platform was fabricated with the aluminum matrix composites with high volume fraction (55% ~ 57%) fraction SiC particles based on a novel pressureless infiltration fabrication technology, and the microstructures, mechanical and physical properties were characterized. Benefiting from the composite's good mechanical properties, such as ultra-high modulus, low thermal expansion coefficient and very high thermal conductivity, the maximum deformation of the inner frame has decreased by 65%, and the fundamental frequency has increased by 70% as compared with those of aluminum alloy materials. Therefore, a significant lightening effect was achieved and the structure's dynamic response is improved. The test result indicated that the stable accuracy of the system achieves 20 μ rad. The system's dependable performance is shown by trial flight. The research applies the SiC/Al composites to airborne photoelectric platforms, which makes an effective exploration for the new aviation material's application.

Key words: SiC/Al composite, unmanned airborne photoelectric stable platform, inner frame

对于不断发展的机载光电稳定系统而言, 其结构总体尺寸正朝着小型化、轻量化的方向发展, 系统整体性能则有高可靠、高精度、长寿命等高性能化的要求。铝合金、钛合金作为机载光电稳定平台光机系统的传统结构材料已日渐不能满足先进技战术指标设计要求: 铝合金具有过高的热膨胀系数,

即随着环境温度的变化, 导致光机结构的尺寸及其形位精度随之变化, 进而影响系统的测量精度、视轴稳定和成像质量。而钛合金不仅比重较大, 而且因导热性能极差增加了主动温控系统的负荷, 使得热控系统复杂、装调的难度大、周期长, 热控效果差, 大范围高低温交变下产生的热光学误差较大。

收稿日期: 2010-11-12

基金项目: 国家 973 重点基础发展规划资助项目(2009CB72400105); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2008AA121813)

作者简介: 程志峰(1979-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事光电仪器结构设计及优化分析等方面的研究, E-mail: chengzhifeng2004@yahoo.com.cn.

另外, 铝合金、钛合金的弹性模量及比模量偏低, 使得系统动/静刚度及谐振频率明显下降, 重量增加较多, 无法实现轻量化。

高体份 SiC/Al 复合材料, 能够集高比模量、高导热、低膨胀、高尺寸稳定性等优点于一身。一旦能够将其低成本地制作成机载光电平台光机系统的结构件及功能件, 就将其低膨胀和超高弹性模量的特性有效地改善系统在力、热载荷作用下的精度稳定性, 以保证在一定温度水平下的长期使用中具有良好的成像质量, 并可望省去传统光机结构设计中的某些复杂环节, 简化结构并减轻重量, 降低光机结构的研制周期、难度和成本。该新型材料还能以其超高导热特性降低光机结构的时间常数和热惯性、保证系统热控的均匀性, 从而较易保持结构的尺寸及形位精度、保证热环境下的像质^[1-4]。

本文利用高体份 (55% ~ 57%) SiC/Al 复合材料, 制备了机载光电稳定平台的主承力框架, 结合传统铝合金材料框架, 对实际结构进行了有限元分析, 并进行了振动试验, 对结构最大变形与结构基频进行了对比。最后, 对整个系统的稳定精度进行了检测, 并通过外场试飞, 有效地验证了系统的可靠性^[5-7]。

1 材料的制备及质量检测评价^[8,9]

1.1 复合材料板材的制备

利用无压浸渗法制备 SiC/Al 复合材料内框架的基本工艺流程如下: 首先, 在耐高温模具中, 将 SiC 颗粒的堆积密度精确在 55% ~ 57% 内。研制了专用的无压浸渗工艺设备, 该设备可保证均温区直径高达 1m 左右。温度保持在 800 左右, 并充满氮气, 在无任何外压情况下保温几个小时, 最终得到 SiC 颗粒堆积体与熔铝之间的高质量的无压浸渗的复合材料坯锭。

1.2 材料的微观组织结构特征

材料的金相照片如图 1 所示, 黑灰色的 SiC 颗粒在白色的铝合金基体中分布均匀, 铝合金基体渗入充分。另外, 根据材料体积密度的实测结果, 复合材料中 SiC 颗粒的体份比达到 55% 左右。由此可知, 尽管在制备过程中, 没有施加任何外力, 但在采用专用的设备和优化的工艺参数, 仍得到了与压力浸渗法相当的材料质量。

图 2 是材料的透射电镜照片, 表征了符合材料的界面状态。材料的导电和导热性能对界面状态很

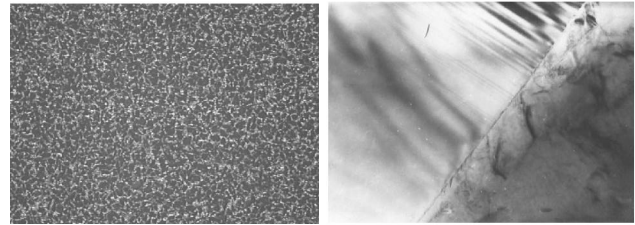


图 1 无压浸渗高体份 SiC/Al 复合材料的金相照片
Fig.1 OM micrograph of high volume fraction SiC/Al composites fabricated by pressureless infiltration

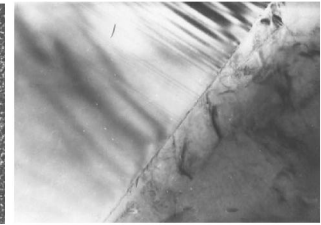


图 2 无压浸渗高体份 SiC/Al 复合材料界面的 TEM 像
Fig.2 TEM image of the interface of high volume fraction SiC/Al composites fabricated by pressureless infiltration

敏感, 必须确保没有任何化学反应产物或界面析出相。本文研究制备的复合材料达到了理想的界面状态, 即原子间匹配良好的物理冶金界面。

1.3 材料的物理性能

表 1 给出了高体份 SiC/Al 复合材料与传统金属结构材料的性能对比。

表 1 传统光机结构材料与高体份 SiC/Al 复合材料的性能对比

Tab.1 Comparison of properties between high volume fraction SiC/Al composites and traditional structural materials for optomechanical system

| | 密度 (gcm ⁻³) | 热膨胀 系数 (10 ⁻⁶ K ⁻¹) | 热导率 (Wm ⁻¹ K ⁻¹) | 弹性模 量 (GPa) | 比模量 (×10 ⁶ m) |
|-------------|----------------------------|--|--|----------------|-----------------------------|
| 铝合金 (2A12) | 2.78 | 22.7 | 120 | 70 | 25.2 |
| 钛合金 (TC4) | 4.44 | 9.1 | 6.8 | 109 | 24.5 |
| 碳钢 (45#) | 7.81 | 11.6 | 48 | 200 | 25.6 |
| SiC/Al 复合材料 | 2.94 | 7.9 | 198 | 213 | 72.4 |

由表 1 可知, 铝基复合材料的密度略高于铝合金, 但仅为钛合金的 2/3; 其弹性模量远高于铝合金、钛合金等; 其比模量是铝合金、钛合金的三倍。其热膨胀系数比铝合金低 65%, 比 45# 钢低 32%; 其热导率比铝合金高 65%, 比 45# 钢高出三倍。可将高体份 SiC/Al 复合材料的性能优势概括为: 热膨胀最小、热导率最高、弹性模量最高、比重较小。

1.4 内框架的加工及检验

为了与铝合金材料进行对比, 本文分别制备这两种材料的无人机载光电平台的内框架。其中铝基复合材料内框架的基本加工方法为: 平面的获得及其尺寸与形位公差控制通过在磨床上平磨来实现; 板材侧面形状的获得通过线切割实现; 内框架坯锭尺寸为 260 mm×159 mm×114 mm, 如图 3 (a) 所

示。而铝合金材料内框架则是按照传统的铸造方法制备。保证材料内部无铸造砂孔，达到航空 II 级标准，气孔率 1%，实物如图 3 (b) 所示。



(a)SiC/Al composites frame (b)Aluminum alloy frame

图 3 航空光电稳定平台内框架

Fig.3 Inner frame of aviation photoelectric stable platform

2 框架结构的有限元分析^[10]

2.1 光电平台主承力框架静力学分析

通过 UG 软件建立结构的三维模型，直接进入结构分析模块，首先对结构进行理想化，去除对分析结果影响很小的通孔、螺纹孔等，并对圆角、倒角进行适当的省略。

进行网格划分时，尽量使单元大小统一以兼顾有限元网格协调性的要求，对结构重点关注的轴孔处进行了手工的网格细化。结构整体厚度比较均匀，统一采用六面体实体网络。框架分别选用铝合金和铝基复合材料进行分析。整个框架共划分为 8028 个单元，16891 个节点。

结构实际工况包括

1.载荷 1：自重载荷，其中包括框架本身的重力与三个传感器的重量所施加在框架上产生的载荷。

2.载荷 2：内框架受直流力矩电机驱动产生的扭矩。依据所选电机的堵转扭矩来定义，取电机堵转力矩值 $M=0.4 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

图 4 给出了加载后的内框架有限元模型图。

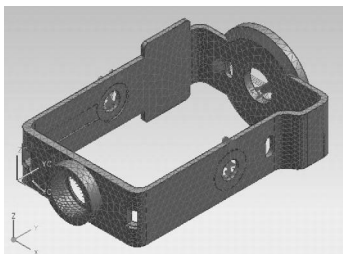
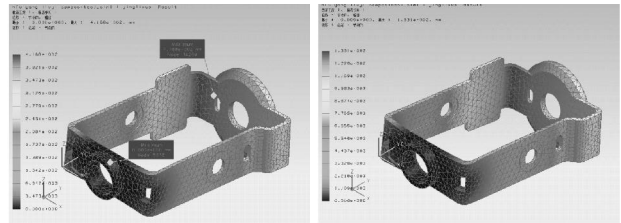


图 4 加载后内框架有限元模型图

Fig.4 Loaded inner frame FEM graphics

图 5 给出了分析得到的框架位移和应力变形云纹图。与铝合金材料相比，采用铝基复合材料后结构最大变形 0.0416mm 降至 0.0133mm。保证了系统变形量在允许范围之内，变形量的减小提高了系统

视轴的稳定性，同时保证了有效载荷视轴平行度。



(a) 铝合金框架位移变形图(b) 铝基复合材料框架位移变形图

图 5 有限元分析结果云纹图

Fig.5 Cloud map of finite element analysis results

2.2 光电平台主承力框架动力学特性研究

为保证机载光电稳定系统具有良好的成像质量，要求光机结构必须具有良好的动态刚度。衡量结构动态刚度的指标是结构的固有频率和振型。因此有必要对框架进行模态分析。

表 2 列出了内框架的前 2 阶固有频率，应用复合材料后的结构基频由 73 Hz 提高至 123Hz，提高了将近 70%。同时，与之相对应的振型表明，结构共振后的变形程度也有明显的减小。

表 2 前两阶固有频率(单位:hz)

Tab.2 The first two natural frequencies(Unit: hz)

| 阶数 | 1 | 2 |
|------|-------|-------|
| 铝合金 | 72.98 | 126.9 |
| 复合材料 | 122.8 | 214.5 |

2.3 环境试验情况

在环境试验站进行了框架正弦振动试验。将两种材料的框架同时装载在振动平台上做振动试验在 20 ~ 500HZ 频域范围内，加载低频扫描，幅值为 2g。分别做两个方向，两个循环，每个循环 15min。

将传感器分别粘在通过有限元分析预知的最大变形的部分，同时振动平台上布置三个传感器来合成整个平台本身的振动，以做参照得出框架的振动曲线。图 6 和图 7 是两种材料的框架在 x、y 方向的振动工作图。

通过对平台框架所做的振动分析，得出振动曲线。得到的结构基频和有限元分析结果相对比，误差很小

表 3 列出了试验得到的两种材料的内框架的前两阶固有频率。

表 3 前两阶固有频率(单位:hz)

Tab.3 The first two natural frequencies(Unit: hz)

| 阶数 | 1 | 2 |
|------|-------|-------|
| 铝合金 | 74.24 | 128.9 |
| 复合材料 | 125.2 | 218.8 |



图 6 X 向振动工作图
Fig.6 X direction
vibration test

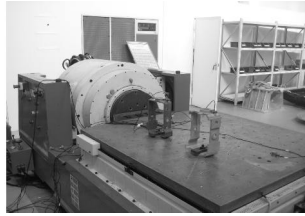


图 7 Y 向振动工作图
Fig.7 Y direction
vibration test

对以上的表格数据分析可知, 试验的数值和有限元分析得到的结果差别不大, 其中复合材料在制备过程中, 预埋件影响到了二者的数值。总体而言, 铝基复合材料的基频远远大于铝合金材料, 结构的动刚度得以很大程度的提升, 表明这种新的材料的选用能达到要求的, 实际使用中复合材料相较于传统的铝合金材料有很大的优势。

3 系统稳定精度检测及外场试飞

3.1 稳定精度检测

系统的方位稳定精度为 $20\mu\text{rad}$, 达到了国内领先水平, 系统有效载荷光轴不平行度为 0.1mrad , 这得益于铝基复合材料低膨胀及超高弹性模量的特性在平台的内框架方面的应用, 有效地改善了系统在力、热载荷作用下的精度稳定性。

3.2 外场试飞验收

先后制备了 6 台套光电稳定平台, 并全部通过考核定型试飞。试飞过程中, 系统整机工作可靠, 无故障出现。顺利的通过了外场验收。

4 结论

1. 成功的采用无压浸渗复合新方法和自行研制的专用工艺设备, 用高体份 SiC/Al 复合材料制备了无人机载光电稳定平台的内框架, 材料件残余应力很小, 焊缝质量良好, 材料的总体性能达到了国际先进水平。

2. 得益于该材料优异的结构承载功能及卓越的热控功能, 结构的平均谐振频率提高大约 68%, 最大变形量减少了 65%。系统有效载荷光轴不平行度为 0.1mrad , 稳定精度为 $20\mu\text{rad}$, 达到国内领先水平。

3. 提高了航空光电稳定平台在力/热双重载荷作用下的轻量化目标, 并保证了系统精度稳定性, 有效载荷的使用空间显著增大, 铝基复合材料可替代铝合金、钛合金用作航空光电平台升降盘、安装盘、主承力框架、基板等关键构件。

参考文献

- [1] 李威, 刘宏伟. 空间光学遥感器中碳纤维复合材料精密支撑构件的结构稳定性[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2173-2179.
- [2] 王忠素, 翟岩, 梅贵, 等. 空间光学遥感器反射镜柔性支撑的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1833-1841.
- [3] 王平, 张葆, 程志峰, 等. 变焦距镜头凸轮结构优化设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 893-898.
- [4] 孙德伟, 张广玉, 张其馨, 等. 石墨纤维增强铝基复合材料在空间遥感器镜筒结构中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 368-374.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [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): 2537-2542.
- [8] 郜吉才, 张飞虎. 纳米硬质合金刀具切削 Al/SiCp 复合材料的实验[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 406-411.
- [9] 葛英飞, 徐九华, 杨辉. SiCp/Al 复合材料的超精密车削试验[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1621-1629.
- [10] 杨洪涛. 四框二轴光电稳定平台框架有限元分析及结构优化[D]. 中国科学院研究生院: 长春光学精密机械与物理研究所, 2006.