

文章编号 1004-924X(2009)02-0368-07

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

孙德伟¹, 张广玉¹, 张其馨¹, 武高辉²

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了设计和制造出性能更加优越的空间遥感器,对一种新型航天材料—石墨纤维增强铝基复合材料(Gr/Al composite)进行了研究。突破了石墨纤维与铝合金的界面反应控制、纤维铺层和缠绕设计等关键技术,成功制备了石墨纤维增强铝基复合材料,材料的密度为 $2.12 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量为 129 GPa,线膨胀系数为 $5.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。针对这种复合材料,摸索出一套完整的加工和后处理工艺,并首次把这种复合材料应用在空间红外遥感器镜筒结构设计中,设计的镜筒较之钛合金镜筒减重 31.8%。最后,完成了镜筒组件的加工装配、透镜的装校和随机振动试验。实验结果表明,镜筒组件的一阶谐振频率为 284 Hz,高于 100 Hz 的设计要求,振动试验后光机系统没有发生变化。上述工作表明,石墨纤维增强铝基复合材料在航天遥感领域具有较高的应用价值。

关键词:石墨纤维增强铝基复合材料;制备方法;空间遥感器;镜筒结构

中图分类号:V257;TP73 **文献标识码:**A

Application of graphite fiber reinforced aluminum matrix composite to body tube structure in space remote sensor

SUN De-wei¹, ZHANG Guang-yu¹, ZHANG Qi-xin¹, WU Gao-hui²

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to design and manufacture more excellent space remote sensor, a new type of astronautic material—graphite fiber reinforced aluminium matrix composite (Gr/Al composite) is investigated. Several crucial technologies, such as interface reaction controls of graphite fiber and aluminum alloy, designs of fiber laminating and winding are systematically studied. Then, Gr/Al composite is successfully prepared in density of $2.12 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; modulus of elasticity of 129 GPa and thermal expansion coefficient of $5.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Aiming at this composite, a set of manufacture and post-processing technology is explored in detail. Moreover, the composite is applied to design of the body tube of a space infrared remote sensor for the first time. The weight of Gr/Al composite body tube is lighter 31.8% than that of titanium alloy. Finally, the body tube preparation and assemble, lens setting

收稿日期:2008-04-17;修订日期:2008-07-04.

基金项目:总装备部共用技术预研资助项目

and calibration, random vibration test are conducted respectively. The experimental results indicate that the first order resonance frequency of body tube component is 284 Hz (more than 100 Hz, design requirement). There is not any change for optical and mechanical system after vibration test. Accordingly, above research suggests that Gr/Al composite has important use value in space remote sensing field.

Key words: Gr/Al composite; preparation method; space remote sensor; body tube structure

1 引言

近年来,复合材料在航天航空领域的应用越来越广泛,特别是金属基复合材料,具有比刚度和比强度高、耐高温耐磨损、线膨胀系数小且可调节、尺寸稳定性好等优点,已经成为钛合金与铍合金的最佳替代材料^[1]。国外在这方面的研究起步较早,20世纪60年代,美国就采用B/Al复合材料管材制造航天飞机轨道器主骨架,较原设计的铝合金框架减重45%。采用42.2% P100石墨纤维增强6061铝制成的哈勃太空望远镜天线悬架是石墨纤维增强铝基复合材料在航天器上的典型应用。加拿大航天局分别应用碳化硅增强铝基复合材料和铍铝合金制成的超轻激光扫描镜将用于新一代空间视觉系统(Space Vision System)^[2]。其他多种复合材料在卫星的展开式天线和空间相机的反射镜上也有所应用^[3-4]。

随着我国航天事业的迅猛发展,复合材料的应用越来越广泛,特别是在空间相机上的应用。根据已经公开的文献资料可知:北京空间机电研究所曾经采用非连续碳化硅增强铝基复合材料(SiCp/Al)制造空间相机的镜盒和镜身^[5]。北京航空材料研究院采用无压浸渗复合方法制备了用作空间光机结构件的高体份SiC/Al复合材料^[6]。另外多种树脂基碳纤维复合材料还被用来制造空间相机的遮光罩、镜筒、底板^[7-8]。

本文采用哈尔滨工业大学材料学院自主研制的石墨纤维增强铝基复合材料进行了空间传感器镜筒结构的设计。主要研究了这种材料的特性,制备方法和加工工艺。首次把这种复合材料应用在镜筒结构设计上,所设计的镜筒已经成功应用于哈工大自主研制的小型空间红外遥感器上,并通过了所有的地面试验和测试。

2 石墨纤维增强铝基复合材料

2.1 材料的特点分析

对于小型空间红外遥感器来说,结构部分不仅要满足高刚度、高强度和尺寸稳定性的要求,而且应该尽量减轻质量。本文研究的空间红外遥感器镜筒材料采用了石墨纤维增强铝基复合材料(Gr/Al Composite,以下简称铝基复合材料),这种材料属于长纤维增强(连续强化)金属基复合材料,由哈尔滨工业大学金属基复合材料研究所自主研制。

与金属材料相比,铝基复合材料具有如下优点:耐高温、高比强、高比模、热膨胀系数小、尺寸稳定性好、对缺口不敏感且抗磨损。与聚合物基复合材料相比铝基复合材料具有如下优点:耐高低温、阻燃、尺寸稳定、抗氧化、抗辐照、抗电磁脉冲、无气化和导热、导电、剪切强度高、热膨胀系数低、可直接加工螺纹和圆孔。

表1比较了常用航天材料的主要性能参数,从中可以看出,铝基复合材料(Gr/Al)的密度比铝小,但是弹性模量比钛大。铝基复合材料的比刚度很大,仅次于铍,但它的生产过程不会像铍一样产生剧毒和污染。它的线膨胀系数为 $5.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,在 ± 50 多次循环下,结构尺寸稳定,可以很好地满足光学系统对温度和结构尺寸稳定性的要求。

表1 常用航天材料性能参数比较

Tab.1 Comparison of performance parameters of frequently-used astronautic materials

材料名称	密度 (10^3 kg/m^3)	弹性模量 E (10^9 Pa)	比刚度 E/ρ ($10^6 \text{ Pa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$)	线膨胀系数 (10^{-6} K^{-1})
铝	2.69	62.0	23.0	23.6
铍	1.85	304	164.3	11.2
钛	4.51	106	23.5	10.2
镁	1.74	44.0	25.3	25.2
宝钢	8.03	145	18.1	0.54
Gr/Al	2.12	129	60.8	5.0

比刚度和比强度高、线膨胀系数小、尺寸稳定性好是铝基复合材料的突出特点,这些特点决定了它是一种制造空间相机镜筒的理想材料。

2.2 材料的制备

普通的碳纤维与铝合金、镁合金存在严重的界面反应,所以不适合制备金属基复合材料。采用石墨纤维(M40, K135),经过合理的制备工艺和界面处理技术,可以抑制界面反应,得到高质量的复合材料。

在石墨增强铝基复合材料的研究中,突破了石墨纤维与铝合金的界面反应控制、大型薄壁构件精密成型和纤维缠绕设计、高可靠性制备技术等多项关键技术,通过挤压铸造法成功制备了M40/Al和K135/Al复合材料。从图1的扫描照片中可以看出,经控制后M40纤维的反应物极其稀少,M40/Al界面洁净。

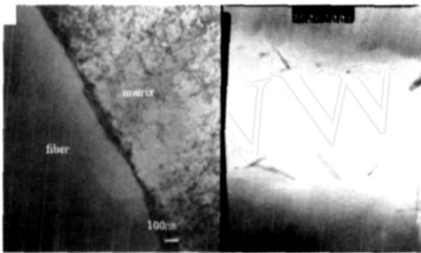


图1 制备的石墨纤维 M40/Al 界面洁净

Fig. 1 Interface illustration of graphite fibers M40/Al

2.3 材料的加工和处理工艺

铝基复合材料是一种设计性很强的材料,可以按照设计者的要求进行石墨纤维的铺层、缠绕、毛坯件的精密成型,这样既可以提高材料性能,又可以节约昂贵的石墨纤维,降低成本。设计人员也可以根据材料纤维铺层和缠绕的特性,在结构上设计合理的过渡与连接,充分利用材料特点,使零部件获得更好的力学性能和尺寸稳定性。这种材料还可以直接加工圆孔和螺纹,不需要安装预埋件,较之树脂基复合材料使用起来更加方便。图2列举了一种典型石墨纤维增强铝基复合材料零件的加工工艺流程。

需要特别注意的是在铝基复合材料的切削加工过程中,一般应使用金刚石刀具,而且不能使用冷却液。由于石墨纤维的存在,普通刀具很容易磨损,切削力的稳定性很差,易引起机床的振动,切削速度也不宜过高。图3展示的是铝基复



图2 铝基复合材料加工工艺流程图

Fig. 2 Processing flow sheet of Gr/Al composite

合材料的毛坯料,图4展示的是精加工后的铝基复合材料,从图中可以看出铝基复合材料的表面加工质量完全可以达到钛合金的水平。这种铝基复合材料发黑过程实际就是在材料表面镀覆双层金属(Ni-P合金和Zn),再进行黑色钝化处理,这样就可以获得耐蚀性能及光学性质良好的膜层,膜层总厚度约为 $30\mu\text{m}$ ^[9]。最后通过超声无损检测来检验零件内部是否存在缺陷。



图3 铝基复合材料毛坯料

Fig. 3 Rough parts of Gr/Al composite

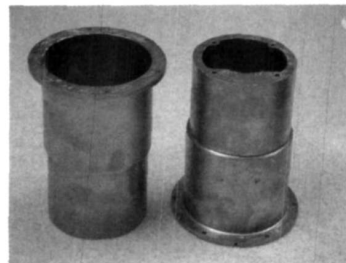


图4 铝基复合材料加工后的成品

Fig. 4 Products of Gr/Al composite after machining

3 应用实例

应用铝基复合材料进行了空间红外遥感器镜筒结构的设计。已经公开的相关文献表明,本文所研究的铝基复合材料是首次应用于空间光学镜筒结构设计。

镜筒是保证红外遥感器成像质量的重要部件。镜筒的结构形式、镜筒材料的选择、镜筒的结构设计不仅要满足光学系统的要求,而且要满足力学性能和真空高低温环境的要求,同时尽可能降低质量。特别是对光学透镜组件来说,其加工与装配都有严格的公差要求,也只有保证各个镜片及其相对位置在空间使用过程中仍然保持地面上的装校精度,才能获得高清晰度和满意的遥感图像。

镜筒主要零件使用了上述体积百分比为 50% 的 M40/Al 复合材料。材料的具体参数为:密度 $2.12 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 129 GPa,线膨胀系数 $5.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,经过 ± 50 多次循环下,结构尺寸稳定。经过加工后,零件安装透镜的端面位置平行度公差可以达到 $10 \mu\text{m}$,表面粗糙度达到 1.6,说明了这种复合材料的加工精度可以达到金属材料的精度。零件表面发黑后测量红外发射率为 0.856(50)。

由于卫星所提供的安装空间有限,本文采用了转折光路设计,如图 5 所示。镜筒组件结构如图 6 所示。设计要点如下:

(1) 镜筒由遮光罩、窗口镜筒、大镜筒、中镜筒、转折镜筒、反射镜压板几部分组成;

(2) 遮光罩由铝蜂窝内胆和碳纤维复合材料外壳组成,具有去除杂散光的功能。窗口镜筒、大镜筒、中镜筒使用铝基复合材料制造。转折镜筒由于形状不规则,采用钛合金精密铸造而成;

(3) 铝基复合材料镜筒的设计过程中特别注意了结构过渡处理,考虑具体的结构尺寸,设计相应的圆角和连接方式,可以更好地适应纤维铺层、缠绕的要求。其加工工艺符合图 2 中的工艺流程;

(4) 考虑到镜筒的直径比较小,主镜筒采用分体结构,便于透镜的安装和调试,透镜各个安装端面要求有高的形位公差,以保证各个透镜的相互平行;

(5) 通过红外定心仪来调整各片透镜的同轴度。透镜边缘注入 XM-23 胶,可以固定透镜,同时保证了透镜和镜筒之间的柔性连接,有一定的减振效果;

(6) 平面反射镜通过反射镜压板与转折镜筒连接,反射镜压板在结构上能实现反射镜角度调整;

(7) 镜筒组件通过螺钉紧固,本身自成一體,这样可以减轻外部干扰对镜筒组件的影响。外部通过两个铝合金支撑座安装固定,如图 7 所示。

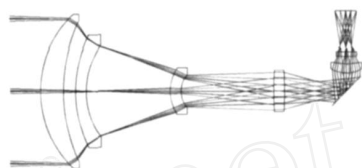


图 5 红外遥感器光路图

Fig. 5 Optical drawing of infrared remote sensor

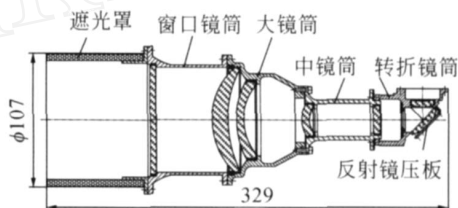


图 6 主镜筒组件结构图

Fig. 6 Structural drawing of body tube

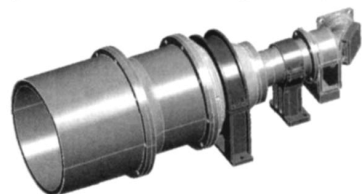


图 7 主镜筒三维外观图

Fig. 7 Three-dimensional outside drawing of body tube

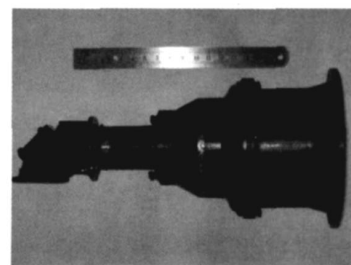


图 8 主镜筒实物图(不含遮光罩)

Fig. 8 Real object of body tube (without shading cover)

镜筒表面经过发黑处理,发黑后如图 8 所示。整个镜筒结构部分的质量为 0.75 kg(不包括光学透镜),比全钛合金镜筒结构减重 31.8%,而且线膨胀系数和尺寸稳定性优于钛合金。

4 镜筒结构的随机振动试验

为了验证镜筒结构设计的合理性,对镜筒组件进行了随机振动试验^[10-11]。试验设备为 ES-50000 型 50kN 电动振动台,在镜筒的最前端安装了 1 个加速度传感器,随机振动试验参数见表 2。

表 2 随机振动试验参数

Tab. 2 Parameters of random vibration test

振动频率 (Hz)	功频谱密度
10 ~ 100	+3 dB/oct
100 ~ 600	0.075 g ² /Hz
600 ~ 2 000	-6 dB/oct

镜筒俯仰方向的一阶和二阶谐振频率分别为 462 Hz 和 925 Hz,镜筒偏航方向的一阶和二阶谐振频率分别为 284 Hz 和 773 Hz。镜筒组件的最低谐振频率为 284 Hz,满足 > 100 Hz 的设计要求。随机振动的响应曲线如图 9,10 所示,图中曲线峰值对应的横坐标为系统的共振频率,纵坐标为响应加速度的数值。

随机振动试验后检查镜筒组件,没有发现螺钉松动和破坏的现象。后期把镜筒组件与焦平面器件连接进行成像试验,图像清晰完整。说明在

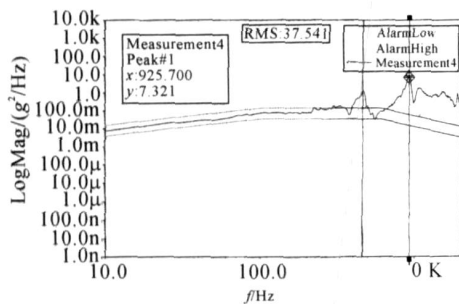


图 9 俯仰方向随机振动的响应曲线

Fig. 9 Response curves of random vibration in pitch direction

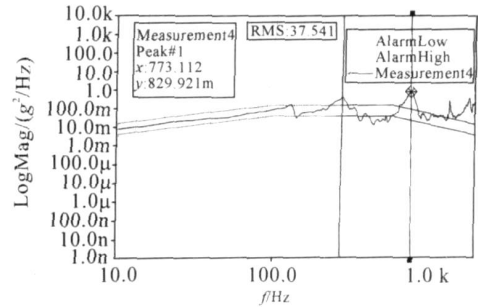


图 10 偏航方向随机振动的响应曲线

Fig. 10 Response curves of random vibration in yaw direction

随机振动试验过程中,无论是结构部件还是光学元件都没有损坏和变形。

在后续过程中还对空间红外遥感器进行了真空高低温,常压热循环和老练试验。试验完成后,对整机各项指标进行测试,一切正常。

5 结 论

本文成功制备了 M40/A1 铝基复合材料,材料的密度为 $2.12 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量为 129 GPa,线膨胀系数为 $5.0 \times 10^{-6} / \text{K}$ 。经过 ± 50 多次循环下,结构尺寸稳定,表明 M40/A1 铝基复合材料是制造空间遥感器结构件的最佳材料之一;解决了这种铝基复合材料的生产工艺流程,切削加工方法,表面发黑处理,缺陷检测等实际问题;首次把这种铝基复合材料应用在空间红外遥感器的镜筒结构上,取得了良好的效果。制造的镜筒质量仅为 0.75 kg,较之钛合金镜筒结构减重 31.8%;通过随机振动试验验证镜筒组件的刚度,试验结果表明镜筒组件的一阶谐振频率为 284 Hz,满足设计要求,振动试验后光路没有发生变化。

综上所述,石墨纤维增强铝基复合材料是一种性能优越的新型航天材料。

参考文献:

- [1] 王大镇,冯培锋,赵清亮,等. 航天铝基复合材料零部件超精密加工技术研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(6):1341-1346.
WANG D ZH, FENG P F, ZHAO Q L, *et al.*. Study on the ultraprecision machining technology of aluminum matrix composite astronautic part [J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(6):1341-1346. (in Chinese)
- [2] JIANG X X, LAURIN D, LEVESQUE D, *et al.*. Design and fabrication of a lightweight laser scanning mirror from metal-matrix composites [J]. *SPIE*, 2001, 4444:1-8.
- [3] MARIA A N, JORGE A C, ROGERIO P L. Composite materials in flexible multibody systems [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, 195:6860-6873.
- [4] CHRISTOPHER C, CHARLES F, BADRI S, *et al.*. Design and structural/optical analysis of a kinematic mount for the testing of silicon carbide mirrors at cryogenic temperatures [J]. *SPIE*, 2004: 204-214.
- [5] 马建平,傅丹鹰. SiCp/AL 复合材料在空间光学遥感器上的应用[J]. 航天返回与遥感, 2000, 21(2): 46-49.
MA J P, FU D Y. Application of SiCp/AL composite material on space optical remote sensor [J]. *Spacecraft Recover & Remote Sensing*, 2000, 21(2):46-49. (in Chinese)
- [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):1175-1178.
CUI Y, LI L F, LI J L, *et al.*. High volume fraction SiC/Al composites for space-based optomechanical structures [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1175-1178. (in Chinese)
- [7] 林再文,刘永琪,梁岩,等. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8):1181-1185.
LIN Z W, LIU Y Q, LIANG Y, *et al.*. Application of carbon fiber reinforced composite to space optical structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1181-1185. (in Chinese)
- [8] 田海英,关志军,丁亚林,等. 碳纤维复合材料应用于航天光学遥感器遮光镜筒[J]. 光学技术, 2003, 29(6):704-706.
TIAN H Y, GUAN ZH J, DING Y L, *et al.*. Carbon fiber composite material used in space optical instrument [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(6): 704-706. (in Chinese)
- [9] 王春雨,苟华松,修子扬,等. Gr/6061 复合材料表面镀覆金属黑变膜的研究[J]. 热处理技术与装备, 2007, 28(5):38-41.
WANG CH Y, GOU H S, XIU Z Y, *et al.*. Study of Metallic Black Coating on Gr/Al Composite Surface [J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2007, 28(5):38-41. (in Chinese)
- [10] 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):1168-1169.
CHEN CH ZH, ZHAO L L, LIU L, *et al.*. Modal calculation and test of truss in space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1168-1169. (in Chinese)
- [11] 于旭东,龙兴武,汤建勋. 机械抖动激光陀螺的随机振动响应分析 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(11):1760-1762.
YU X D, LONG X W, TANG J X. Random vibration analysis of mechanically dithered ring laser gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1760-1762. (in Chinese)

作者简介:



孙德伟(1981 -),男,辽宁鞍山人,博士研究生,主要从事空间光学仪器结构设计,动力学分析和振动控制等方面的研究。Email: sdw1981@yahoo.com.cn



张其馨(1938 -),男,河南周口人,工学学士,教授,主要从事精密仪器,机电一体化设备的设计与制造等方面的研究。Email: zhangqj@hit.edu.cn

导师简介:



张广玉(1962 -),男,黑龙江集贤人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事机械结构设计、建模与仿真,优化与动力学分析等方面的研究。Email: zgyqx@hit.edu.cn



武高辉(1955 -),男,黑龙江哈尔滨人,工学博士,教授,博士生导师。主要从事金属基复合材料的制备和应用技术的研究。Email: wugh@hope.hit.edu.cn

下期预告

基于自适应模糊逻辑的多模型跟踪算法

陈 谋,姜长生

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 210016)

为了克服基于“当前”统计模型的交互式多模型算法难以恰当地确定当前模型的概率,以及系统参数 a_{\max} 和 a_{\min} 在跟踪过程中不能自适应调整的缺点,给出了一种基于自适应模糊逻辑的多模型跟踪算法。首先,对基于“当前”统计模型的交互式多模型算法进行介绍,给出了算法的基本步骤。接着,在“当前”统计模型算法基础上,提出了一种基于自适应模糊逻辑的多模型跟踪改进算法。采用模糊推理给出了模型的选择概率,以提高跟踪的快速性。同时采用蚁群算法对设计参数进行优化,以提高跟踪的精度。最后,将所设计的基于“当前”统计模型的多模型改进算法用于机动目标的跟踪仿真。实验结果表明:改进算法使得跟踪精度提高 20% 左右;机动目标跟踪一次仿真时间为 0.047 s。基本满足目标跟踪的快速性和高精度等要求。