

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2016.06.012

SiC/Al 铝基复合材料在惯性器件上的应用研究

杨朋军,李良,雷志强,杨瑞超
(西安航天精密机电研究所,西安 710100)

摘要:近年来, SiC/Al 复合材料在现代军事型号中的应用日益广泛。以某型号平台台体为研究对象,先后用 ZL107 传统材料、SiC/Al 复合材料加工了两种台体,并进行了对比试验,结果表明, SiC/Al 复合材料台体较 ZL107 传统材料台体结构性能显著提高。

关键词: SiC/Al 复合材料; 研究

中图分类号: TH113

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2016)06-0063-04

Research on the Application of SiC/Al Composite Material on Inertial Device

YANG Peng-jun, LI Liang, LEI Zhi-qiang, YANG Rui-chao
(Xi'an Aerospace Precision Electromechanical Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In recent years, the application of SiC/Al composite material in the modern military field has become more and more extensive. ZL107 traditional material and SiC/Al composite material are used for processing two platforms of the same type, and the contrast experiment has been carried out. The results show that, compared with ZL107 traditional material platform, the structural performance of SiC/Al composite material platform improves significantly.

Key words: SiC/Al composite material; Research

0 引言

惯性平台系统作为惯性坐标基准广泛应用于各种运载火箭、导弹及其他飞行器中,平台结构系统的静、动态特性直接影响着惯性仪表的工作精度和可靠性。随着航天技术和国防事业的日益发展,现代军事技术对新型号惯性平台不仅要求具有更高的精度和可靠性指标,而且要求具有系统小型化、轻量化、定型快以及适应大过载、大冲击等恶劣力学环境条件的特点。要满足平台系统精度高、轻量化、抗冲击、抗过载等恶劣力学环境条件的特点,有两条途径可以实现此项指标:一是采用新型比刚度高材料;二是对平台结构进行改进和优化设计。在平台结构系统受结构形式、外围空间等因素限制的情况下,采用新型比刚度高材料以达到上述要求就显得尤为重要^[1]。

1 铝材和 SiC/Al 复合材料性能对比

惯性平台结构件多为形状复杂、精度高的精密

零件,如平台内环、外环、台体、基座等,要求其在高温变化、振动冲击等工作环境下,具有抵抗永久变形和长时间保持精度稳定的能力。这就对结构材料提出了严格要求,如高比刚度,良好的力学性能,稳定的物理、化学性能,低膨胀系数,较高的微屈服抗力等。因而,平台结构件必须应用具有优良特性的材料。新型铝基复合材料的出现充分满足了平台系统高性能、高可靠性的要求。

1.1 惯性平台结构件传统材料局限性

目前平台结构件主要以铝合金材料为主。铝合金密度小,具有不锈钢的比强度和优良的力学性能,工艺性能优异。但铝合金弹性模量小,在切削加工时表现出刚性差、结构受力变形较大、尺寸稳定性较差等缺陷,具体表现在以下方面:1)自发变形:铝合金长时间会发生应力松弛现象,导致结构零件的自身变形;2)低应力变形:铝合金的微屈服强度很低(约 80~150MPa 左右),零件装配过程的拧紧力、粘合力等应力足以使零件产生微小变形;3)热失配变形:铝合金热膨胀系数与配合零件(如

收稿日期:2015-11-01;修订日期:2015-12-14。

作者简介:杨朋军(1979-),男,硕士,高级工程师,主要从事精密仪器与机械分析、设计。

E-mail: abcyangpengjun@126.com

框架轴、轴承座)等相差将近1倍,长期服役过程中容易使配合精度、结构应力、预紧力发生变化,这种变化足以导致铝合金产生永久的微变形,导致平台长期稳定性变差;4)热错配变形:铝合金在变温过程中,例如系统多次启动材料内部容易发生位错的移动等现象,这些现象的积累造成零件发生不可逆变形。上述各种因素同时存在,任何一种微小变形均可以造成惯性平台的精度不稳定^[2]。

1.2 SiC/Al 复合材料性能介绍^[3-6]

本文研究的材料为哈尔滨工业大学研制的光学级 SiC/Al 复合材料。该材料具有如下特点:1)较

高的比强度、比刚度;2)微屈服强度高,能够承受胶结应力、禁锢应力、热错配应力等长期应力载荷而不发生微小不可逆变形;3)尺寸稳定性好,在长期存放或交变温度场冲击下不发生体积、尺寸、形状变化;4)热膨胀系数适宜,与轴承钢、不锈钢相匹配,可以减少在交变温度场下的热错配应力;5)导热性高,能够迅速均温达到热平衡、满足快速启动要求;6)该材料具有良好的振动模态,避免谐振;7)环境适应性强。SiC/Al 复合材料与其他常用材料的性能指标对比如表1所示。

表1 SiC/Al 复合材料与其他材料的性能指标对比

Tab.1 Properties comparison of SiC/Al composite material and other materials

项目	SiC/Al	ZL107	LY12	不锈钢
比重/(g/cm ³)	2.9	2.68	2.78	7.9
热膨胀系数/10 ⁻⁶ C ⁻¹	11~13	21.4	23	16.6
弹性模量/GPa	145~150	77	71	184
拉伸断裂强度/MPa	>530	>220	470	>520
屈服强度/MPa	>420	>180	345	275

本文以某型号平台台体为研究对象,先后用 ZL107 传统材料、SiC/Al 复合材料加工了两种台体,并进行了对比分析和试验,结果表明, SiC/Al 复合材料台体较 ZL107 传统材料台体结构性能显著提高。本文的研究对象如图1所示。

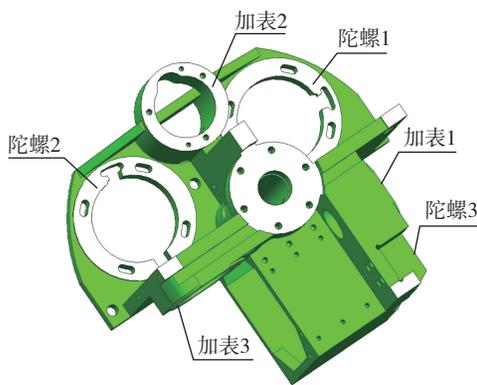


图1 台体结构图

Fig.1 The structure of platform

2 两种材料台体结构性能对比

2.1 两种材料力学仿真计算对比^[7]

为了全面了解两种材料台体结构的动态特性,本论文对 ZL107 传统材料台体、SiC/Al 复合材料台体进行了±40g 空间过载分析、模态分析,其中两种材料台体模态振型图如图2、图3所示,其分析对比

如表2所示。

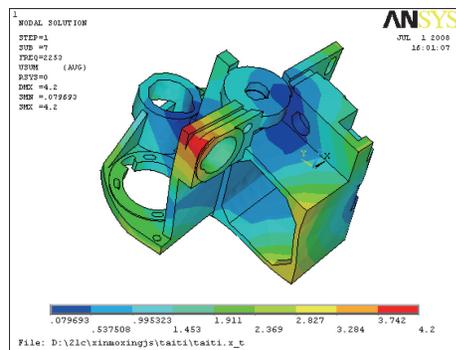


图2 ZL107 材料台体第1阶振型

Fig.2 The first mode of ZL107 material platform

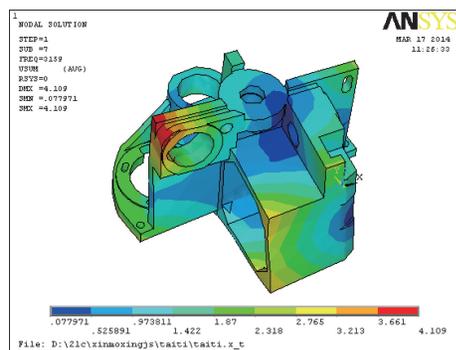


图3 SiC/Al 复合材料台体第1阶振型

Fig.3 The first mode of SiC/Al composite material platform

表 2 两种材料有限元计算结果对比

Tab. 2 FEM results comparison between SiC/Al composite material and ZL107 material

项 目	ZL107 台体	SiC/Al 台体
过载分析	过载条件下台体最大位移/mm	0.44×10^{-5}
	过载条件下台体最大应力/MPa	15.1
台体自由模态分析	台体第 1 阶固有频率/Hz	2253
	台体第 2 阶固有频率/Hz	3128
台体组件约束模态	台体组件第 1 阶固有频率/Hz	910
	台体组件第 2 阶固有频率/Hz	1010

从图 2、图 3、表 2 可以看出, SiC/Al 复合材料台体在过载条件下最大位移、最大应力较 ZL107 台体有所减小, 说明 SiC/Al 复合材料较 ZL107 材料抗过载能力强。SiC/Al 复合材料台体其动态频率为 3159Hz, 比 ZL107 材料台体动态频率提高了约 40%, 说明平台台体通过采用比刚度高的材料可以大幅度提高其动态频率。

2.2 两种材料模态试验对比^[8-9]

本文对两种材料台体进行了模态试验, 测出了两种台体在 0~4100Hz 频率范围内的传递函数, 其结果如图 4、图 5 所示。

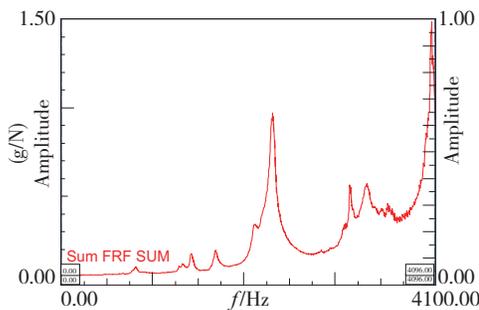


图 4 ZL107 材料传递函数

Fig. 4 The transfer function of ZL107 material platform

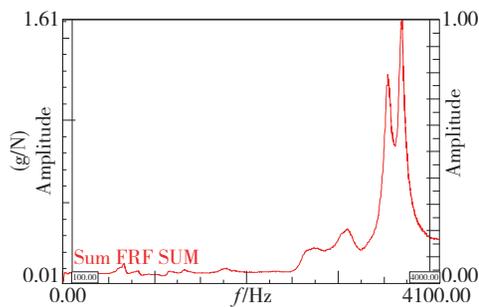


图 5 SiC/Al 复合材料传递函数

Fig. 5 The transfer function of SiC/Al composite material

通过对两种材料台体进行模态试验, 可以得出

如下结论: 在 0~2000Hz 工作频率范围内, SiC/Al 复合材料台体集总传递函数相对 ZL107 传统材料台体光滑, 且谐振峰相对较少, 说明在以上工作频率范围内, 采用 SiC/Al 复合材料能够有效避免台体自身模态被激起, 进而有效改善惯性仪表工作环境。

2.3 两种材料稳定性试验对比^[10]

为了比较 SiC/Al 复合材料和 ZL107 传统材料的稳定性, 本文对上述两种材料加工的台体进行了稳定性测试, 其方法是利用短期的温度循环冲击代替长期放置时间, 测试两种材料台体的形位稳定性。具体试验步骤如下: 1) 将两种材料台体分别置于 3 座标台上, 放稳夹紧, 测量指定面的平面度以及其相对于指定基准的位置度并记录; 2) 第一次试验将两种材料的台体同时置于高低温试验箱内, 在 30min 内将试验箱内温度由室温升至 $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$, 保温 4h 后在 30min 内将试验箱内温度降至 $(-40 \pm 2)^\circ\text{C}$, 保温 4h 后在 30min 内将试验箱内温度升至室温, 此为一个温度循环。进行 2 个循环周期后, 将 2 件台体从试验箱中取出, 对台体进行形位测量; 3) 重复步骤二 2 次, 进行温度循环试验, 然后对台体进行形位测量。因篇幅所限, 本文仅列出陀螺、加表安装面平面度稳定性测试结果, 具体如表 3 所示。

表 3 两种材料精度对比

Tab. 3 Precision comparison between SiC/Al composite material and ZL107 material

项 目	ZL107 台体	SiC/Al 台体
陀螺 1 安装面	第一次	0.004
	第二次	0.003
	第三次	0.001
	最大相对变化	0.003
陀螺 2 安装面	第一次	0.005
	第二次	0.005
	第三次	0.005
	最大相对变化	0

续表

项 目	ZL107 台体	SiC/Al 台体	
陀螺 3 安装面	第一次	0.004	0.004
	第二次	0.002	0.004
	第三次	0.002	0.004
	最大相对变化	0.002	0
加表 1 安装面	第一次	0.004	0.005
	第二次	0.004	0.005
	第三次	0.004	0.005
	最大相对变化	0	0
加表 2 安装面	第一次	0.005	0.004
	第二次	0.005	0.004
	第三次	0.003	0.003
	最大相对变化	0.002	0.001
加表 3 安装面	第一次	0.003	0.006
	第二次	0.001	0.006
	第三次	0.001	0.005
	最大相对变化	0.002	0.001

通过表 3 可以看出,对两种台体施加相同的温度条件,铸铝台体最大相对变化为 0.003, SiC/Al 复合材料台体最大相对变化为 0.002,说明在同样温度条件下, SiC/Al 复合材料台体较之铸铝台体稳定性更好。

3 结论与意义

本文以某型号平台台体为研究对象,先后用 ZL107 传统材料、SiC/Al 复合材料加工了两种台体,并进行了有限元仿真分析、模态试验、稳定性试验

对比。结果表明, SiC/Al 复合材料台体静刚度、动刚度明显高于 ZL107 台体,台体结构因材料改变动态特性得到明显提高。借助新型高比刚度、高稳定材料,可以提高惯性平台结构件的强度、刚度,适应大过载、大冲击等恶劣力学环境条件,进而使惯性平台具有更高的精度和可靠性指标,延长惯性平台服役时间。

参考文献

- [1] 钟万登,催佩勇. 液浮惯性器件[M]. 北京:中国宇航出版社,1994.
- [2] 邓益元. 静压液浮陀螺平台系统[M]. 北京:中国宇航出版社,2012.
- [3] 钟宇,熊计,赵国忠,等. 铝基复合材料的研究现状[J]. 轻合金加工技术,2008,36(12):9-13.
- [4] 郑喜军,米国发. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺,2011,40(12):99-103.
- [5] Lee J C, Ahn J P, Shi Z L, et al. Methodology to design the interfaces in SiC/Al composites[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2001, A32(6):1541-1549.
- [6] Kim Y, Lee J C. Processing and interfacial bonding strength of 2014 Al matrix composite reinforced with oxidized SiC particles [J]. Materials Science and Engineering, 2006, A420(1):8-12.
- [7] Karpurapu R, Bathurst R J. Development of a finite element analysis postprocessing program[J]. Advances in Engineering Software, 1993, 16(1):15-22.
- [8] 史东锋,许锋,申凡,等. 结构在环境激励下的模态参数辨识[J]. 航空学报,2004,25(2):125-129.
- [9] Word H, Lammens S, Sas P. 模态分析理论与实验[M]. 白化同,郭继忠,译. 北京:北京理工大学出版社,2001.
- [10] 杨朋军. 台体模态及稳定性测试试验报告[R]. 中国航天科技集团公司第九研究院十六研究所,2014.