

仪表级复合材料在惯性仪表中的应用进展

武高辉, 姜龙涛, 陈国钦, 苟华松, 张强, 修子扬
(哈尔滨工业大学 金属复合材料与工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 铝基复合材料是近年来发展起来的一类先进工程材料, 具有高的比强度和比模量, 特别是这些复合材料各向同性, 并且具有比 *Be* 更高的抗微小变形的能力和优异的尺寸稳定性, 另外, 还可以对这些材料进行热膨胀系数设计以便和其他材料匹配。由于这些材料可以大批量、稳定制备, 且可以精密加工成复杂形状, 使它们成为惯性仪表构件的理想材料。本文综述了近年来, 惯性领域中仪表级复合材料国内外的应用研究现状, 讨论了仪表级复合材料应用对惯性仪表精度提高所产生的积极作用。

关键词: 仪表级复合材料; 惯性仪表; 尺寸稳定性; 研究进展

中图分类号: V41 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8110 (2014) 01-0063-06

Application Progress of Instrument Grade Al Matrix Composites in Inertial Instruments

WU Gao-hui, JIANG Long-tao, CHEN Guo-qin, GOU Hua-song, ZHANG Qiang, XIU Zi-yang
(Institute of Metal Matrix Composite Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150008, China)

Abstract: As a new class advance engineering material, Al matrix composites demonstrate high specific strength and stiffness and isotropic behavior. Moreover, they offer distinctive performance advantages over conventional beryllium, including higher resistance to micro-deformation and better dimensional stability. Furthermore, Al matrix composites can be tailored to match the coefficients of thermal expansion (CTE) of other materials, including beryllium, stainless steel, and electroless nickel. They could be produced stably in large quantity and be precision machined into complex sharp. Therefore, they have been identified as promising materials for inertial instruments components. In the present work, domestic and abroad practical applications progress of instrument grade Al matrix composites in advanced guidance equipment have been presented, and the corresponding improvement effect in accuracy have been discussed.

Key words: Instrument grade Al matrix composites; Inertial instruments; Dimensional stability; Research progress

0 引言

目前我国的武器装备研究进入到了“高精度”、“小型化”的阶段, 进入到这一阶段后, 以往的传统结构材料明显暴露出先天不足。在惯性技术领域, 如传统 LY12 铝合金材料存在弹性模量低、自发变形、低应力变形、热失配变形等无法解决的问题^[1]。铍材的应用技术是一个国外曾经验证过的成功的技术, 是可行的^[2], 但是, 铍材的毒性问题、成本问题也是一个现实问题。

金属基复合材料按力学性能、加工性能和尺寸稳定性、热学性能等特性的不同分为结构级、仪表级和光学级三类。其中仪表级复合材料的力

学性能和热物理性能符合惯性构件的设计的要求。

我国自“十五”开始, 在新材料与惯性技术的学科交叉上迈出了具有历史意义的一步, 第三代仪表材料——仪表级 SiC/Al 复合材料研制成功, 预示着仪表结构材料的更新换代的开始。

1 高精度惯性仪表材料的国内外发展历程

1.1 国外仪表级复合材料应用进展

国外陀螺仪表材料发展经历了三个阶段: 20世纪50年代, 美、苏等国主要采用铝合金, 进入60年代开始采用铍材, 1964年, 美国研制成功全铍惯性平台 ST-124^[3]。使陀螺仪精度提高了一

收稿日期: 2014-06-15; 修订日期: 2014-07-16。

作者简介: 武高辉 (1955-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事金属及其复合材料的设计、制备、工艺及应用等方面的研究。E-mail: wugh@hit.edu.cn

个数量级。有研究者将专门用来制造惯性制导系统的精密部件的金属基复合材料定义为“仪表级复合材料”。1981年这种材料被首次制造出来,1984年仪表级复合材料制导部件样品送审,1985年被批准用于一种导弹制导系统的惯性测量单元(图1)^[4]。这些仪表级复合材料部件被精确的锻造成网状,同时这些金属基复合材料制造的部件也是首次应用于制导系统。

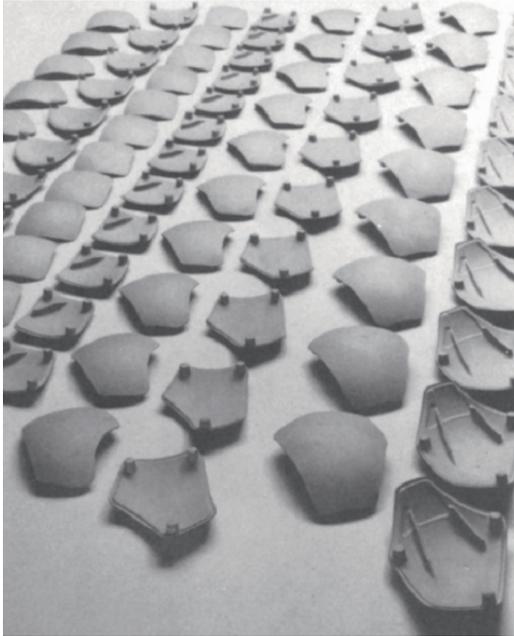


图1 应用于导弹制导系统中的精密成型的铝基复合材料构件^[4]

Fig.1 Precision forged MMC instrument covers used in a missile guidance system^[4].

美国研究者看中了金属基复合材料的热物理性能可设计性以及低成本等优势,在有更高精度要求的惯性仪表中开始应用。美国AMC公司与亚利桑那大学光学科学中心合作,设计一种直径为0.3m的超轻(ULW)空间望远镜,采用新材料(包括金属基复合材料)来设计、建造和组装一种望远镜,目标就是以最低的成本实现高精度和高性能的轻质结构。图2给出了惯性仪表、光学反射镜的中铝基复合材料的应用范例^[4]。连接主反射镜和次反射镜的桁架装置是由结构级金属基复合材料模压出一根25mm,1.25mm厚的管状材料制备而成,次反射镜的支撑是由结构级金属基复合材料模压出杆制成的。次反射镜的基座是由经化学镀镍抛光后的光学级金属基复合材料制成,

制成以后,每个ULW望远镜的总重量为4.5kg。1999年美国在三叉戟-II导弹高精度陀螺仪零件上使用了仪表级SiC/Al复合材料^[5],结果证明,铝基复合材料以其低膨胀、尺寸稳定、高导热、低密度、低成本等特性,成为目前在惯性仪表上唯一可以替代铍材的材料。

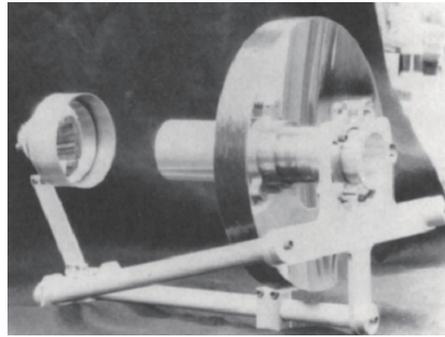


图2 铝基复合材料加工的超轻量级的望远镜样机^[4]

Fig.2 Prototype ultra-lightweight (ULW) telescope incorporating MMC materials^[4].

1.2 国内仪表级SiC/Al复合材料应用进展

作者二十多年来,在仪表级复合材料稳定化的组分设计、大尺寸、高品质仪表级SiC/Al复合材料制备、稳定化原理及工艺研究和仪表级复合材料精密加工成型等研究上取得了突破性进展,所设计和制备的仪表级SiC/Al复合材料性能具有尺寸稳定、热适配性好的特点^[6,7],其与惯性仪表常用材料性能对比如表1所示,可见,其微变形抗力较RJY50铍材高出1倍;热膨胀系数与铍材相当,冷热冲击条件下的尺寸稳定性高于RJY50铍材。仪表级复合材料的精加工性能优异,关键部位加工精度达到微米量级。这种仪表级复合材料已经通过的军品质量认证,并得到了武器装备生产许可,已开始小批量供应,这标志着我国惯性仪表材料更新换代的开始。

图3为采用仪表级SiC/Al复合材料生产的某型号惯性测量与导航系统结构件,由于突破了研制出了大尺寸($\Phi 300\text{mm} \times 150\text{mm}$)高品质制备技术,所制备的仪表级SiC_p/Al复合材料在交变温度场下尺寸稳定性可以稳定在 1×10^{-5} 以内。成功用于某型号的惯性测量与导航系统主体结构件。

图4为仪表级SiC/Al复合材料挠性平台关键构件,通过对挠性平台台体的复合材料构件装机

测试表明,与铝合金平台台体的进行模态测试和温度冲击循环试验,发现 SiC/Al 复合材料相对铸铝材料模态频率提高了 36%,台体结构因材料改变使刚度提高较为明显;同时,通过对两种材料

台体进行高低温冲击试验,可以看出在高低温冲击试验条件下,复合材料台体较之铸铝台体热稳定性好。

表 1 几种主要惯性仪表结构材料的性能指标

Table 1 Properties comparison of instrument grade SiC/Al composites to conventional materials

	仪表级 SiC/Al	RJY50	不锈钢	ZL201	LY12	GCr15	TC4
密度 / (g/cm^3)	2.9	1.85	7.9	2.80	2.78	7.81	4.44
热膨胀系数 / ($10^{-6}/\text{K}$)	11.5	11.5	16.6	19.3	23	13.3	9.1
热导率 / ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	130~150	150	16.3	121	150	36.7	6.8
弹性模量/GPa	145~150	303	184	71	71	212	110
微屈服强度/MPa	>220	60~100	<100	<100	<120	—	—
冷热冲击下的尺寸稳定性/ 10^{-5}	0.8~1.0	>7	—	>50	20~6	—	—

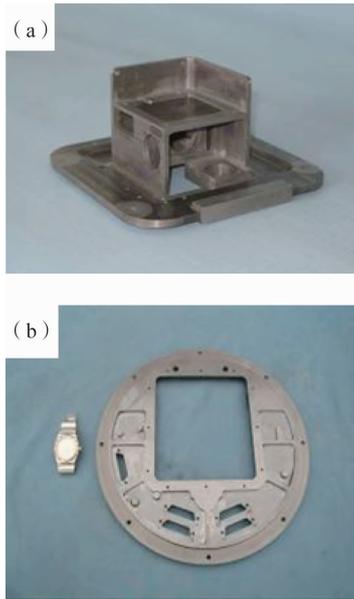
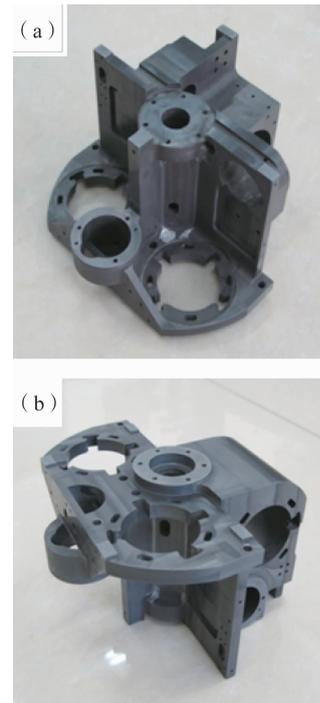


图 3 某型号惯性测量与导航系统结构件 (仪表级 SiC/Al 复合材料)

Fig. 3 Inertial measurement and navigation systems structure components (Instrument grade SiC/Al composites)

在高精度液浮陀螺仪上开展了仪表级 SiC/Al 复合材料的应用研究,图 5 为某型号液浮陀螺仪 SiC/Al 复合材料零件,装机测试了半铍半复合材料的陀螺仪 (框架为铍材,其余均为复合材料),并与 LY12 铝合金陀螺仪进行了对比测试,表明,陀螺仪的精度提高了 5 倍,逐次漂移精度提高了几十倍,表明了复合材料在高精度陀螺仪等精密仪表零部件上应用对提高仪表精度效果显著。



4 仪表级 SiC/Al 复合材料挠性平台关键构件
Fig. 4 Instrument grade SiC / Al composites key components for flexible platform

2 复合材料在惯性仪表中应用的优势分析

2.1 惯性构件精度的影响因素

以惯导平台为例:目前影响精度的因素主要有:1)平台、框架等结构件弯曲变形;2)振动谐振;3)热变形及其温度场等三个主要部分。

(1) 弯曲变形 (包括弹性弯曲变形)

在框架加工和安装绝对对称的条件下,平移变形不会引起误差。如框架加工和安装对称,弯



图5 高精度陀螺仪 SiC/Al 复合材料零件
Fig. 5 Instrument grade SiC / Al composites component for High - precision gyroscopes

曲变形对误差的影响也不大,但是绝对对称的加工和安装是不存在的,弯曲将引起附加角运动,引起较大误差。所以希望材料具有高的刚度(弹性模量)。

(2) 振动变形

振动过载时引起附加误差,谐振时最为严重。因此希望材料具有一定的阻尼特性,使用铍材的理由也是因为铍材的阻尼系数较大的缘故。

(3) 热场影响

在对精度产生影响的几个因素中,热影响最大。热场变化会带来几个方面的问题。其一,不同材料的热胀系数差别过大必然在温度变化时产生装配精度变化、预紧力变化从而丧失原始精度,所以希望各个零件的热膨胀系数相近。各零件中轴承钢是不可改变的,只有让其它材料与轴承钢相近,采用铍材也是这个道理;其二,材料发生不可逆微变形。材料在交变温度场下最容易发生不可逆形变。其三,热均匀性问题。为获得稳定的运行条件,平台各部件必须在恒定温度下工作,恒温时间长短就成了快速启动的决定性因素。为此,希望材料的导热率要大。

正因为各个零件又不满足热膨胀系数匹配、高导热等要求,使温控系统带来了复杂性。

2.2 金属基复合材料用于惯导平台的优势分析

结构件弯曲变形、振动谐振和热变形及其温度场这些对精度影响很大,这些问题均可通过对复合材料有目标的设计加以改善。例如通过调整增强体的粒径、种类和含量,就可以提高材料的刚度、增加材料的阻尼、使构件的热膨胀系数与

配合件相适应,以及提高材料的导热率^[8-9]。表1说明,通过调整复合材料的组分,在密度确几乎相当的情况下,可以使材料 CET 调整到与其它材料(如铍、不锈钢、钛等)相匹配,同时材料的弹性模量可较铝合金提高1倍以上,微屈服强度及尺寸稳定性均较铍材高,这一结果与美国对细小的35vol% SiC/Al 复合材料(被称为仪表级金属基复合材料)的性能测试结果相一致,研究表明,仪表级复合材料的抗压缩蠕变性能远远由于铍材。

我们可以从单项误差因素来粗略地分析使用仪表级金属基复合材料对制导精度产生的影响。

(1) 抗振抗冲击

与铝合金相比,仪表级复合材料在800~2000Hz 频率下的阻尼系数要大2~3倍,用于框架、台体、基座可以大大改善平台的振动模态,提高整体抗震能力。

用仪表级复合材料替代12个不锈钢轴承座(轴端件),可以直接减重3.7kg,大大缓和框架的过载负担,从而提高平台的抗震能力。同时,也解决了长期没解决的平台超重问题。图6为采用仪表级 SiC/Al 复合材料制造的轴承座和轴端件,减重效果明显。另外,由于复合材料弹性模量比铝合金高1倍,抗过载冲击变形可以较铝合金提高一倍。

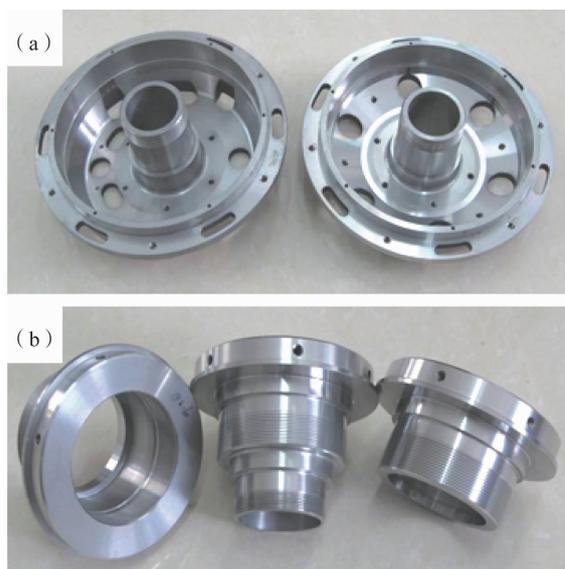


图6 仪表级复合材料轴承座和轴端件
Fig. 6 Instrument grade SiC / Al composites component for bearing and related components

(2) 尺寸稳定性问题

任何材料都存在尺寸形状微小变化的特性,特别是在温度变化的条件下微变形更加剧烈。

通常,铝合金在加工过程中便边加工边变形,边修整,在存放过程中也要变形。经验表明,加工 $\Phi 50\text{mm}$ 的铝合金零件变形在 0.01mm ,加工铍材在 $1\sim 2\mu\text{m}$,而加工复合材料的经验表明,加工 $\Phi 300\text{mm}$ 的 $2\sim 10\text{mm}$ 的惯导安装板,周边变形在 $4\mu\text{m}$ 以内,复合材料的尺寸稳定性高于铍材。

在 $20\sim 150^\circ\text{C}$ 冷热冲击过程中,ZL201尺寸变化在 10^{-4} 量级;LY12在 $2\times 10^{-4}\sim 6\times 10^{-5}$ 量级;RJY50铍材为 $7\times 10^{-5}\sim 8\times 10^{-5}$ 量级,而复合材料在 $0.8\times 10^{-5}\sim 1\times 10^{-5}$ 量级,是铝合金的近10%。这种不可逆变形直接带来的是逐次漂移。漂移误差与变形是近似平方关系,因此,应用复合材料可使逐次漂移显著降低。

(3) 热稳定性提高

惯性仪表材料希望具有与钢材匹配的热膨胀系数,以保证装配精度。不锈钢为 $12\times 10^{-6}\sim 13\times 10^{-6}/\text{K}$,铍材为 $11.8\times 10^{-6}/\text{K}$,复合材料为 $11\sim 12\times 10^{-6}/\text{K}$ 。2A12铝合金的热膨胀系数为 $23.3\times 10^{-6}/\text{K}$,与轴承钢 $13.3\times 10^{-6}/\text{K}$ 相差77%,可见,铍材与轴承钢的热膨胀系数相差11.3%,而复合材料与轴承钢的差别仅在6%以内,因此,这一影响引起的误差将会减到万分之几,仪表级复合材料热物理性能具有可替代铍材的能力。

(4) 缩短启动时间

启动过程是一个热均衡和各个零件应力和间隙调整完毕的过程。不锈钢的导热率仅为 $16.3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,台体的热量要由空气对流和12个不锈钢轴承座传导到两个框架和基座,效率低,导致启动过慢。铍材导热率为 $150\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,复合材料与铍材的导热率相近,而且热容量小,那么,框架、轴承座均换成复合材料之后,有希望使启动时间大为缩短。

由于惯性仪表的受力环境不大,所以,应用复合材料可以主要解决热变形问题;对于台体、框架,因为几乎所有的仪表都要安装在台体上,在过载和振动环境下,最易发生微变形和非对称弹性变形,所以可以解决刚度、振动阻尼、尺寸稳定问题;对于轴端件,主要可以解决尺寸稳定

和减重的问题。

2.3 金属基复合材料用于惯导平台的经济性分析

仪表级复合材料应用的最大困难是精密加工问题,近年精加工技术得到了长足的发展,已经制造出高精度的惯性仪表构件,复合材料加工由于需要金刚石刀具,刀具成本较高,但不需要特殊的防护措施,运行成本低,综合加工成本可低于铍材^[10]。

3 结论

从国内外在惯性仪表选材的历程,以及国外发展的趋势可以看出,金属基复合材料用于惯导系统是材料研究与应用的发展方向,也是解决惯性技术瓶颈问题的有效技术途径,付诸实际应用,可以实现“投入少、见效快”的效果。

参考文献

- [1] 杨德明,潘进,卓钺,万红,费肖卿,尹新方. SiCf + p/LY12 复合材料口盖板的制备与结构刚度 [J]. 宇航学报, 1999, 20 (1): 99 ~ 103. [YANG De-ming, PAN Jin, ZHUO Yue, WAN Hong, FEI Xiao-qing, YIN Xin-fang. Preparation and structural stiffness of hybrid SiC reinforced aluminum composite hatch cover plate [J]. Journal of Astronautics, 1999, 20 (1): 99 ~ 103.]
- [2] Hany F. Mokbel, Wan Yuan, LvQiong Ying, Cao Guo Hua, Amr A. Roshdy. Research on the mechanical design of two-axis fast steering mirror for optical beam guidance [C]. Proceedings of 2012 International Conference on Mechanical Engineering and Material Science (MEMS 2012). 2012: 205 ~ 209.
- [3] W. D. WOOD, C. L. COFFIN. Hemispherical total-emittance measurement in the temperature range 175 to 350 k for selected thermal-control and corrosion-protection coatings [C]. AIAA 3rd Aerospace Sciences Meeting. New York, USA, 1966. 18.
- [4] Walter R. Mohn, Daniel Vukobratovich. Recent applications of metal matrix composites in precision instruments and optical systems [J]. Optical Engineering, 1988, 27 (2): 225 ~ 235.
- [5] A. P. Divecha, S. D. Karmarkar, M. N. Gungor, A. H. Nakagawa. Structures and mechanical properties of centrifugally cast SiC/Al composites [J]. Technical Digest, 1993: 42 ~ 51.
- [6] JinfengLeng, Gaohui Wu, Qingbo Zhou, Zuoyong Dou, XiaoLi Huang. Mechanical properties of SiC/Gr/Al composites fabricated by squeeze casting technology [J]. ScriptaMaterialia, 2008, 59 (6): 619 ~ 622.
- [7] Qiang Zhang, Gaohui Wu, Longtao Jiang, Guoqin Chen. Ther-

- mal expansion and dimensional stability of Al - Si matrix composite reinforced with high content SiC [J] . *Materials Chemistry and Physics*, 2003, 82 (3): 780 ~ 785.
- [8] Qiang Zhang, Gaohui Wu, Guoqin Chen, Longtao Jiang, Bofeng Luan. The thermal expansion and mechanical properties of high reinforcement content SiCp/Al composites fabricated by squeeze casting technology. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.
- [9] Qiang Zhang, Gaohui Wu, Dongli Sun, Guoqin Chen, Longtao Jiang. Microstructure and thermal conduction properties of an Al - 12Si matrix composite reinforced with dual sized SiC particles. *Journal of Materials Science*, 2004, 39 (1): 303 ~ 305.
- [10] JinfengLeng, Longtao Jiang, Qiang Zhang, Gaohui Wu, Dongli Sun, Qingbo Zhou. Study of machinableSiC/Gr/Al composites. *Journal of Materials Science*, 2008, 43 (19): 6495 ~ 6499.