

文章编号 1004-924X(2007)08-1175-06

制备空间光机结构件的高体份 SiC/Al 复合材料

崔岩¹, 李丽富², 李景林², 任建岳²

- (1. 北京航空材料研究院 先进复合材料国防科技重点实验室, 北京 100095;
2. 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:采用无压浸渗复合新方法和自行研制的专用工艺设备,低本地制备了用作空间光机结构件的高体份(55%~57%)SiC/Al 复合材料大尺寸坯锭,并对其微观结构特征、基本的力学及热物理性能和断裂机制予以表征。此外,还通过线切割、电火花成型等特种加工手段将该种复合材料制造成反射镜背板、焦面板等一系列空间光机结构用典型样件。研究表明,该材料既有优异的结构承载功能(弹性模量 213 GPa,而比模量则比铝合金、钛合金及钢高出近两倍),又有卓越的热控功能(其热膨胀系数比钛合金还要低,热导率接近纯铝,达到 235 W/m·K),若以其替代钛合金用于空间光机结构可望获得显著的轻量化效果并降低热控负荷、改善热控效果。

关键词:SiC/Al 复合材料;高体份;无压浸渗;空间光机结构

中图分类号:V447.3;TH703;V254 **文献标识码:**A

High volume fraction SiC/Al composites for space-based optomechanical structures

CUI Yan¹, LI Li-fu², LI Jing-lin², REN Jian-yue²

- (1. *National Key Laboratory of Advanced Composites, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China*;
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: Using the special self-manufactured processing equipment, we fabricated the aluminium matrix composites with high volume fraction (55%~57%) SiC particles based on a novel pressureless infiltration fabrication technology. The microstructures, mechanical and physical properties, fracture mechanism of the composites were characterized. Additionally, several kinds of typical optomechanical components for space-based optical systems were produced successfully by means of electromachining (such as wire electrical discharge), grinding, abrading, etc. The investigation reveals that the composites have good mechanical properties, such as ultra-high modulus (the Young's modulus is 213 GPa, the specific modulus is approximately as three times as Al, Ti, and steel), as well as prominent thermal management function (low thermal expansion coefficient ($8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), and very high thermal conductivity (235 W/m·K)). Experimental results show that the new multi-function and light-

收稿日期:2007-05-22;修订日期:2007-07-18.

基金项目:航空基金资助项目(No. 03G21012);武器装备预研基金资助项目(No. 51412010304HK5106, No. 51460040204ZK1001)

weight SiC/Al composites can be used in the optomechanical systems in the space field to improve greatly the thermal management effect and to sharply decrease the whole weight of the space-based optomechanical structure.

Key words: SiC/Al composite; high volume fraction; pressureless infiltration; space-based optomechanical structure

1 引言

对于大中型空间光机系统(如航天相机)而言,焦距或视场的增大,会造成其光学系统体积的增大,进而使得系统支承的构件设计制造难度加大。为适应空间环境要求,需要此类构件的候选材料具有更大的比刚度,以保障微重力下的镜面变形要求;同时还须具有高的尺寸稳定性与热稳定性,而线胀系数要小,以保证在空间长期使用中及一定温度水平下有良好的成像质量;另外,对导热性能也有较高要求,目的是保证结构的温度均匀性,减少因温度不均匀引起热弹性变形。

传统的空间光机结构材料主要是钛合金,其优点是工艺稳定,应用成熟,可以制造形状复杂的构件。但由于其比重较大,比刚度、热导率比较差,采用其作为光机结构材料,相机动/静刚度明显下降,重量增加较多,对热控系统要求较高。对于大中型空间光机系统,这些缺点尤为突出。

包括钛合金在内的传统单一材料由于设计自由度很有限,不仅比刚度几乎无法提高、轻量化潜力很小,而且无法获得特定的物理性能(既低膨胀又高导热),更无法实现其力学性能与特定物理性能的理想匹配。因此,在传统结构材料(如铝合金)基础上的复合化是唯一的技术出路,只有设计、研发适宜的复合材料才可能全面满足空间光机结构的特定需求,实现优异的结构承载功能与良好热控制功能的集成。

在国外,高体份(50%~60%)碳化硅颗粒增强铝基(SiC/Al)复合材料的研究已有十几年的历史,与相对较为成熟的低体份(10%~20%)、结构级碳化硅颗粒增强铝基复合材料相比,它的功能特性更为突出:它不仅具有比铝合金和钛合金高出两倍的比刚度,其线胀系数比钛合金还低,而热导率则远优于钛合金甚至铝合金^[1-6]。因此,如果以该种新型材料替代钛合金用于空间光

机结构,既可大幅度减重、又易于保持结构精度、显著降低光机系统在大范围高低温交变下产生的热光学误差,增强对空间环境的适应性,从而简化甚至可能部分取消通常必须采用的复杂的主动温控系统、降低相机分系统甚至整星系统的功耗,提高系统可靠性和寿命。长期以来,高体份 SiC/Al 复合材料大尺寸制品的关键制造技术—无压浸渗工艺一直为美国 LANXIDE 公司一家所掌握,并被美国国防部明确列为非转让技术。严格的技术封锁阻碍了该材料的推广应用,因此迄今为止只有在美国的部分军用卫星、深空探测器等先进航天器上才会出现高体份 SiC/Al 复合材料相关产品^[7-9]。

为打破国外的技术垄断与封锁、满足我国大中型空间光机系统技术发展的迫切需求,本文采用自行研制的专用工艺设备、以自主研发的无压浸渗复合新方法低成本地制备空间光机结构件用高体份(55%~57%)SiC/Al 复合材料大尺寸坯锭,并对其微观结构特征、基本的力学及热物理性能和断裂机制予以表征。此外,还通过线切割、电火花成型、平磨等特种加工手段将其制造成反射镜背板、焦面板等一系列空间光机结构用典型样件,以此来初步验证高体份 SiC/Al 复合材料在我国大中型空间光机结构中应用的技术可行性。

2 材料制备与加工、测试方法

本文提出的高体份 SiC/Al 复合材料无压浸渗制备基本工艺流程如下:首先,选择适宜品质及粒度的 SiC 颗粒,将其装入耐高温模具中并将其堆积密度精确控制在 55%~57%内。然后,采用完全是自行研制的无压浸渗专用工艺设备(均温区直径达 1 m),在无需施加任何外压的情况下,~800℃、氮气气氛下保温数小时,就可以实现 SiC 颗粒密堆积体与熔铝之间的高质量的无压浸渗复合,从而获得完整、致密的复合材料坯锭。

对于高体份 SiC/Al 复合材料的制备而言,无压浸渗可以说是最佳工艺方法。传统的搅拌铸造和粉末冶金这两种制备方法都对陶瓷颗粒的加入量有严格的限制,搅拌铸造法只能用于制备陶瓷颗粒体积分数不超过 25% 的铝基复合材料,而对粉末冶金法而言, SiC 体积分数的上限一般也只能放宽至 35%, 因此其热控功能有限,弹性模量也不会太高,在对材料的热膨胀系数及刚度有更严格的要求时,就难以满足。可制备陶瓷颗粒体积分数超过 50% 的铝基复合材料的工艺方法只有传统的压力浸渗法和本文开发的无压浸渗新方法。但压力浸渗法的生产费用较高、使用设备较多且复杂,并因高压的施加使得大型化制备能力受到很大限制。而无压浸渗制备技术无需考虑压力系统及其吨位问题,因而设备投资极低、产品大尺寸化制备能力极强,这对其推广应用及工程化非常有利。目前,北京航空材料研究院正在建设无压浸渗大型专用工艺设备,即将具有制备直径或对角线达 1.5 m 的高体份 SiC/Al 复合材料大型构件的能力。

本文采用无压浸渗法制备出的高体份 SiC/Al 复合材料坯锭最大尺寸为 650 mm × 500 mm × 85 mm。

对于本文研制的高体份 SiC/Al 复合材料,主要采用线切割、电火花成型、平磨等特种加工手段来制作组织观察、性能测试用试样以及反射镜背板、焦面板等一系列的空间光机结构用典型样件。

本文采用德国 Leica 公司的 DMRA/E 型光学显微镜观察分析材料的金相组织特征,采用日本 JEM-2010 透射电子显微镜观察分析材料的微观结构特征尤其是界面结合状态,采用美国 Amray-1000B 扫描电子显微镜观察材料的断口形貌特征、分析其断裂机制。

材料的密度测试采用阿基米德法,参照标准: GB/T1423-96; 弯曲强度及弹性模量测试采用三点弯曲法,参照标准: GB/T5593-96, 试验设备为美国的 MTS-810 万能试验机,弹性模量的测定是通过在弯曲试样的跨距中部拉应力面粘贴电阻应变片来实现的; 热扩散系数及热导率测试采用激光脉冲法(测试温度为室温),参照标准为: GJB1201. 1-91; 热膨胀系数试验参照标准: GJB332-87, 测试温度范围分别为室温~100℃及 -65~150℃; 材料的比热容采用绝热法测定,参

照标准为: GJB330A-2000。材料性能试样规格、尺寸及取样数量等依据本文作者带头起草的我国金属基复合材料领域首部国军标《高体积分分数碳化硅颗粒/铝基复合材料规范》(GJB5443-2005)。

3 材料的组织性能与断裂机制

由图 1 所示的光学金相照片可以看出,尽管在材料浸渗复合过程中没有施加任何外加压力,本文获得的高体份 SiC/Al 复合材料其金相组织还是十分致密的,且 SiC 颗粒(呈灰黑色)在铝合金基体(呈灰白色)中分布得十分均匀。另外,材料体积分数的实测结果表明,无压浸渗法制备的高体份 SiC/Al 复合材料基本达到了其理论密度。由此可见,采用本文开发的低成本无压浸渗制备新方法,尽管在浸渗过程中没有施加任何外力,但通过工艺参数的优化并借助有效的专用工艺设备仍可保证与压力浸渗法相当的材料致密性。

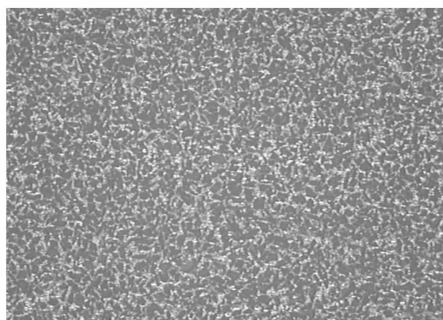


图 1 无压浸渗高体份 SiC/Al 复合材料的金相照片
Fig. 1 OM micrograph of high volume fraction SiC/Al composites fabricated by pressureless infiltration

界面状态对高体份 SiC/Al 复合材料的性能有着很大的影响,特别是其导热及导电性能对界面状态颇为敏感,而空间光机结构应用等典型背景恰恰对材料的导热性有严格的要求,而要实现产品的高精度电加工又需要材料具有良好的导电性。因此,从确保高导热、导电性的角度来看,紧密结合与无显著界面化学反应是获得低热阻及低电阻型理想界面的基本准则。本文通过基体铝合金成份的精心设计和制备工艺参数的优化,成功地获得了十分理想的 SiC/Al 界面状态,即紧密的、原子间直接匹配的物理冶金结合界面。界面的普通透射电镜(TEM)照片见图 2,高分辨透射

电镜(HRTEM)照片见图 3。TEM 和 HRTEM 观察中未见任何界面化学反应产物或界面析出相,X 射线衍射相分析(图 4)也证实了这一点。

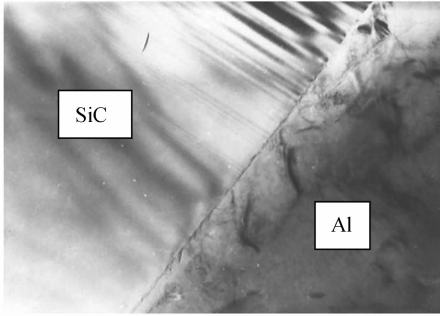


图 2 无压浸渗高体份 SiC/Al 复合材料界面的 TEM 像
Fig. 2 TEM image of the interface of high volume fraction SiC/Al composites fabricated by pressureless infiltration

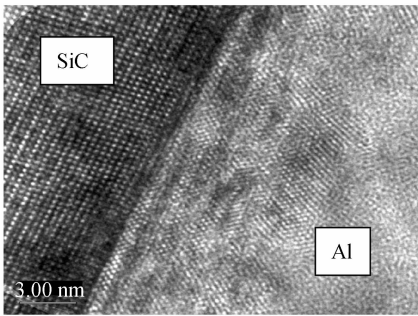


图 3 无压浸渗高体份 SiC/Al 复合材料界面的 HR-TEM 像
Fig. 3 HRTEM image of the interface of high volume fraction SiC/Al composites fabricated by pressureless infiltration

表 1 给出了本文制备的高体份 SiC/Al 复合材料基本力学及物理性能的典型值。表中可见,该材料的密度与铝合金接近,而弹性模量却比 45 # 钢还略高一些,约为钛合金的两倍、铝合金的三

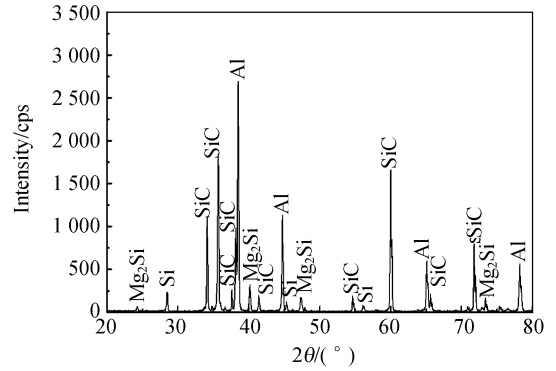


图 4 无压浸渗高体份 SiC/Al 复合材料的 XRD 图谱
Fig. 4 XRD spectrum for high volume fraction SiC/Al composites fabricated by pressureless infiltration

倍。该复合材料的比模量高达 72.4×10^5 m,接近铝、钛、钢三大金属结构材料的三倍,由此可计算出它的平均谐振频率将比铝合金、钛合金高出约 70%,这将使系统更抗共振进而有利于保持系统在振动载荷作用下的精度稳定性。这种复合材料热导率明显高于铝合金,而同纯铝接近。如此之高的热导率进一步证实了本文获得的 SiC/Al 界面状态是理想的、是低热阻的。与此同时,该材料的热膨胀系数仅为铝合金的 $\frac{1}{3}$ 左右,比钛合金还低。除室温 $\sim 100^\circ\text{C}$ 测试温度范围以外,本文还测试了该材料 $-65 \sim 150^\circ\text{C}$ 的热膨胀系数,结果也是 $8.0 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。该材料的电阻率测试结果为 $18.6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$,该值明显低于美国公开的典型值 ($30 \sim 50 \mu\Omega \cdot \text{cm}$)^[5]。这意味着本文制备的高体份 SiC/Al 复合材料具有更高的导电性,更适于高精度电加工。对于因陶瓷含量过高而难于机械加工的高体份 SiC/Al 复合材料而言,导电性好、易于电加工,其工程意义重大。

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 systems

参 数	铝合金(LY12)	钛合金(TC4)	碳 钢(45#)	高体份 SiC/Al 复合材料
密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.78	4.44	7.81	2.94
弹性模量 E/GPa	70	109	200	213
比模量 $(E/\rho)/10^5 \text{ m}$	25.2	24.5	25.6	72.4
热导率 $\lambda/(\text{W}/\text{m} \cdot \text{K})$	120	6.8	48	235
热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6} \text{ K}^{-1})$	22.7	9.1	11.6	8.0

通过表 1 的比较,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。因此,以之替代铝合金及钛合金结构件用于空间光机系统,将会显著提高系统在力、热载荷作用下的精度稳定性并大幅度减轻其重量。

图 5 是本文制备的高体份 SiC/Al 复合材料断口的低倍扫描电镜照片,可以看到复合材料的断口宏观形貌较为平齐,有着连续的致密显微结构,金属浸渗得很充分,也很均匀。基体铝合金包围 SiC 颗粒,与颗粒之间界面结合强度较高,未见 SiC 颗粒被拔出现象。图 6 是复合材料断口的高倍扫描电镜照片,由该图可见, SiC 颗粒全部以穿晶解理的方式发生脆断。

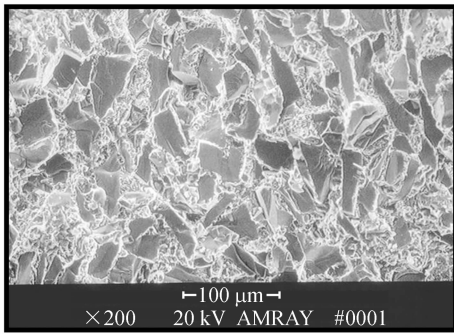


图 5 SiC/Al 复合材料断口形貌(低倍)

Fig. 5 SEM morphology of fracture surface of high volume fraction SiC/Al composites (low magnification)

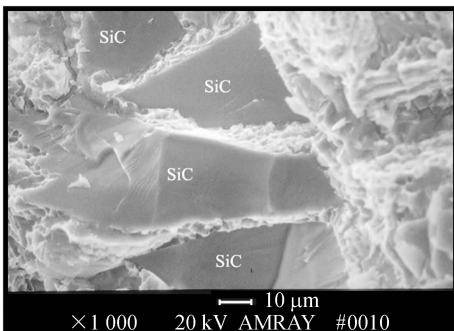


图 6 SiC/Al 复合材料断口形貌(高倍)

Fig. 6 SEM morphology of fracture surface of high volume fraction SiC/Al composites (high magnification)

SiC 颗粒断裂而非与铝合金基体脱粘的失效方式从另一个角度进一步验证了本文制备的高体份 SiC/Al 复合材料界面结合良好,结合强度很高,而这种高强度界面结合方式不仅对材料的力学性能有利,对材料的精密加工也十分有利。在加工过程中如果 SiC 颗粒从铝合金基体中被拔出,工件的表面就必定很粗糙,光洁度就无法保证,高精度的面形就很难获得。与之相反,界面强度很高,在加工过程中 SiC 颗粒只能沿着加工面被切削开来,故而工件表面就能得到很高的光洁度。

4 典型样件的制造

本文采用线切割、电火花成型、平磨等特种加工手段,通过工艺参数的优化,实现了高体份 SiC/Al 复合材料的高精度加工,成功地制造出反射镜背板、焦面板等一系列的空间光机结构用典型样件。其中长度最大的样件长达 650 mm,面积最大的样件尺寸达到 596 mm×444 mm。通过平磨可使该材料的表面粗糙度 $Ra < 0.8 \mu\text{m}$,通过光学加工可使其 $Ra < 10 \text{ nm}$ 。图 7 给出了本文制造的一种典型件照片。

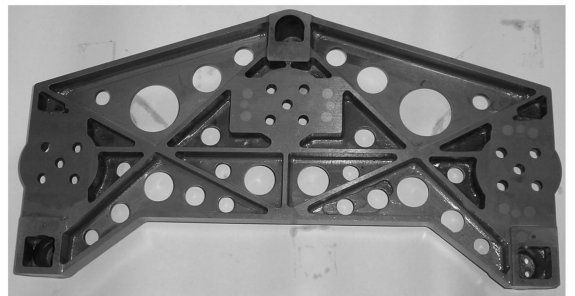
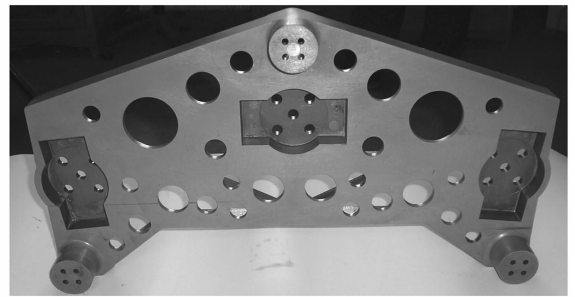


图 7 高体份 SiC/Al 复合材料空间光机结构典型样件

Fig. 7 Typical optomechanical component for space-based optical systems of high volume fraction SiC/Al composites

5 结 论

本文采用无压浸渗复合新方法制备出体份高达 55%~57%、坯锭最大尺寸达到 650 mm×500 mm×85 mm 的 SiC/Al 复合材料。该复合材料组织较为均匀、致密,界面状态十分理想,为低热阻、低电阻、高结合强度的原子间直接匹配物理冶金结合型界面。与铝合金、钛合金、钢材等金属结构材料相比,该复合材料的热膨胀系数最小($8.0 \times 10^{-6}/\text{K}$)、热导率最高(235 W/m·K)、弹

性模量最高(213 GPa)、比重较小(仅略高于铝合金,为 2.94 g/cm³),而其比模量则接近铝、钛、钢三大金属结构材料的三倍。

针对本文研制出的高体份(55%~57%)SiC/Al 复合材料,通过采用特种加工手段并优化工艺参数,能够满足空间光机结构用典型样件的加工精度要求。若以该种新型复合材料替代钛合金用于空间光机结构,将会在显著减轻结构重量的同时提高结构热控的均匀性、简化热控系统并保证热空间环境下的像质。

参考文献:

- [1] SUNGHO J. Advances in thermal management materials for electronic applications [J]. *JOM*, 1998, 6:46.
- [2] MARUYAMA B, HUNT W H. Discontinuously reinforced aluminium: current status and future direction [J]. *JOM*, 1999, 11:59-61.
- [3] ZWEBEN C. Advances in composite materials for thermal management in electronic packaging [J]. *JOM*, 1998, 6:47-51.
- [4] ZWEBEN C. Metal-Matrix composites for electronic packaging [J]. *JOM*, 1992, 7:15-24.
- [5] Lanxide Electronic Components, Inc. LEC property and products [C/OL]. 1999, 6, <http://www.lec-inc.com>.
- [6] RAWAL S. Metal-Matrix composites for space applications [J]. *JOM*, 2001, 4:14-17. 51.
- [7] KUNZE J M, BAMPTON C C. Challenges to developing and producing MMCs for space applications [J]. *JOM*, 2001, 4:22-25.
- [8] 崔岩. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的航空航天应用 [J]. *材料工程*, 2002, 6:3-6.
CUI Y. Aerospace applications of silicon carbide particulate reinforced aluminium matrix composites [J]. *Materials Engineering*, 2002, 6:3-6. (in Chinese)
- [9] ZUFIA A, HAND R J. The production of Al-Mg alloy/SiC metal matrix composites by pressureless infiltration [J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(5):955-961.

作者简介:崔岩(1969—),男,黑龙江人,北京航空材料研究所研究员,博士,主要从事金属基复合材料的制备及应用研究工作,先后主持科研课题十余项,发表学术论文 30 余篇,现任中国材料研究学会理事,中国复合材料学会理事,中国航空学会非聚合物基复合材料专业委员会副主任,《材料工程》杂志编委等职。E-mail:yan62128.cui@sohu.com