

C/SiC 材料在国外空间光学系统上的应用

朱晓娟 夏英伟

(北京空间机电研究所,北京 100076)

文 摘 C/SiC 复合材料具有高的比强度、低的热变形敏感度以及在高低温环境下的适应性,这使其成为目前最具前途的空间光学系统应用材料。本文总结了国外一些国家 C/SiC 的制备方法及其在空间技术上的具体应用。

关键词 C/SiC 复合材料,空间光学,遥感,反射镜,光机结构

Application of C/SiC Composites in Space Optical System Abroad

Zhu Xiaojuan Xia Yingwei

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076)

Abstract Carbon fiber reinforced silicon carbide ceramic matrix composites (C/SiC) is a material that possess high specific stiffness, low sensitivity of thermal distortion and the adaptability in high and cryogenic temperatures, which make it a most promising space optical application material. The article summarizes the fabrication processes of C/SiC and the practical application of C/SiC to space technologies abroad.

Key words C/SiC Composites, Space optics, Remote sensing, Reflector, Opto-mechanical structures

0 引言

随着空间遥感技术的不断发展,要求未来的遥感系统必须大型化、轻量化,这使得对空间光学应用系统(包括反射镜、结构以及仪表设备)的尺寸和性能的要求越来越苛刻^[1]。为了满足这些要求,需要研发具有密度低、比强度高、弹性模量高、热变形量小、各向同性好等特点的新材料^[2],而且这种材料能够快速、低成本地制造出大型复杂结构件。与其他遥感光学材料相比,C/SiC 复合材料具有优异的物理性能和良好的工艺性能,是制作大型轻质遥感系统的理想材料。本文主要对国外一些国家 C/SiC 的制备方法及其在空间技术上的具体应用开展了调研、总结工作。

1 研究现状

以 IBCOL、ECM 及 DSS 等公司为首的德国与日法荷俄联合研发了一种快速且廉价制备轻型 SiC 反射镜的新工艺——短切碳纤维增强碳化硅基复合材料(C/SiC),日本 MELCO 公司用一定比例混合的高强碳纤维和高模碳纤维替代了同一种短切碳纤维对这种 C/SiC 工艺进行了改进,获得了性能更好的 SiC 陶瓷基复合材料。这种制备技术主要包括^[3-7]:高温连接技术、精确打磨技术和喷涂技术。图 1^[4]列出了德国制备 C/SiC 光学结构或光机结构的制备过程,其过程可以分为三个主要目标:制备 C/C 多孔预制品,加工近净尺寸的 C/SiC 光学结构或光机结构,制备光学表面。

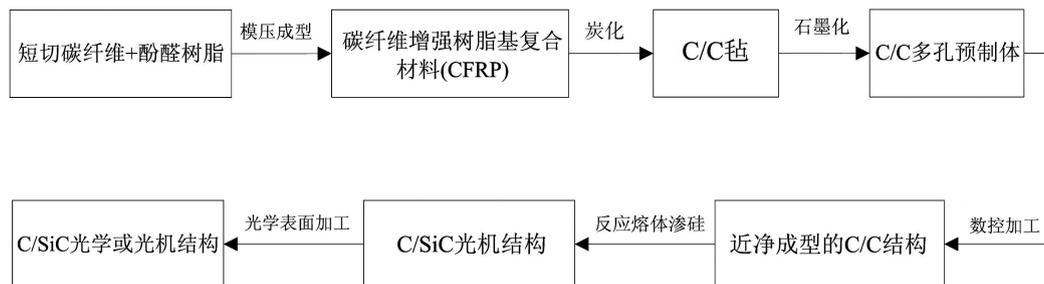


图 1 C/SiC 的制备过程

Fig. 1 C/SiC manufacturing process.

收稿日期:2013-06-13

作者简介:朱晓娟,1985 年出生,助理工程师,主要从事复合材料研究。E-mail:1627417011 @ qq. com

2 在国外空间光学系统的具体应用

目前已经商业化的空间光学系统用 C/SiC 复合材料有两种:一种是 Cescic[®];另外一种是 HB-Cescic[®],后者是前者的改进,即短切纤维采用了高模和高强的碳纤维。

2.1 德国

(1) C/SiC 超轻扫描镜:某型卫星其反射镜在热-力-刚度、光学以及质量上要求十分严格,因此选用了 C/SiC,其结构如图 2^[4]所示。镜面背部结构中有跨度 60 mm 的方形凹块,每根加强肋的厚度为 1.2 mm,肋上还有一个大的切口,这个切口是为了增加结构效率,同时也增加了扫描镜的热学性能,尤其是在真空环境下。镜面是一层 CVD SiC,抛光到 60 nm,表面粗糙度 < 2 nm。在其与平衡架及 CFRP 框架组装后,外形尺寸没有减小。其总质量仅为 7 kg,面密度大约为 14 kg/m²。

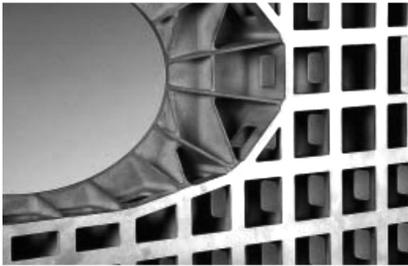


图 2 某型卫星超轻 C/SiC 反射镜背部

Fig. 2 Ultra lightweight C/SiC mirror rear side

(2) C/SiC 高精度光学镜架:制备超轻硅红外光学支撑结构——光学架和光具座的最适宜材料是 C/SiC,这些结构需要在 30~450 K 的工作温度里保持很高的光学性能,能够在空间环境内正常工作。图 3^[4](a,b)给出了光学架的结构,它们的最低结构频率为 1.4 kHz。图 3(c,d)给出了镜片与支撑结构连接的伸缩接头。

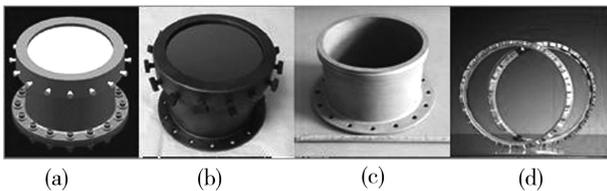


图 3 C/SiC 高性能光学架及伸缩接头

Fig. 3 High performance optical mount based on C/SiC

(3) 三维高精度结构:C/SiC 具有优异的可连接性,这使得可以分别加工出各部分、各组元,然后将其组装成为一个复杂的三维整体。可以将 C/SiC 反射镜和 C/SiC 高精度支撑结构组装成全陶瓷的望远镜体系。也可以实现像光具座等整体的陶瓷构件,这些构件要比常规的全玻璃、全铝或铍型结构具有更优的刚度和热-力学性能。图 4^[4]给出了一个大型的全 C/SiC 整体基准结构(激光平板),其尺寸为 $\Phi 1.5 \text{ m} \times 2.6 \text{ m}$,这个结构是 EADS 和 ESA 设计、制造的,已宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013 年 第 4 期

成功测试,它的光具座的清晰度为 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

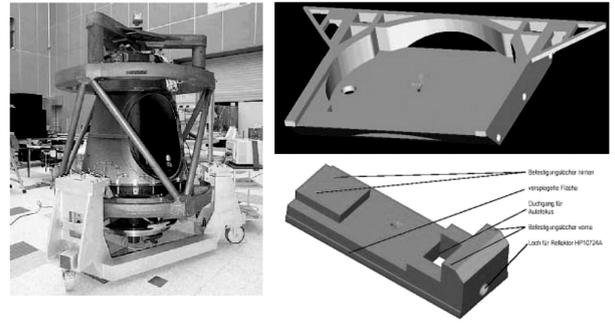


图 4 大型 C/SiC 整体验证结构

Fig. 4 Large C/SiC verification structure for thermal-stability and environmental tests

(4) 1 m M4AU 平板结构:图 5^[8]给出了 1 m M4AU 平板结构示意图。这个平板结构用于 ESO European Extremely Large Telescope (E-ELT),制备材料选用的是 HB-Cescic[®]。

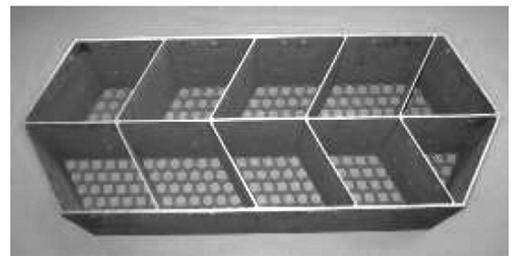
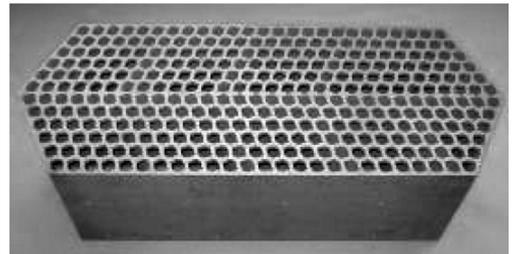


图 5 1 m M4AU HB-Cescic[®]平板结构示意图

Fig. 5 M4AU breadboard

(5) 超轻 HB-Cescic[®]反射镜:图 6^[8]给出了 ECM 使用 HB-Cescic[®]制备的 1 m 反射镜,图 6 上图是预制体阶段反射镜的上下框架,图 6 下图是渗硅后成为整体的 HB-Cescic[®]反射镜。

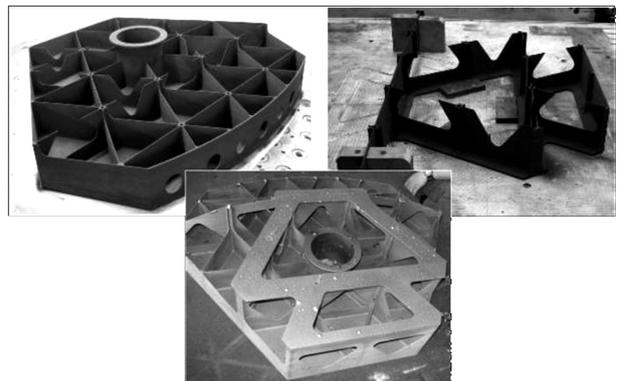


图 6 1 m HB-Cescic[®]反射镜

Fig. 6 1 m HB-Cescic[®] mirror demonstrator

(6) 其他:在对比了全铝、Zerodur[®]以及全 HB-Cesic[®]的优缺点后,Asteroid Finder telescope 选用了全 HB-Cesic[®]设计;IXO 的光具座的翼瓣也选用了 Cesic[®]制备,图 7^[9]给出了 Cesic[®]翼瓣;俄罗斯联邦宇航局主导多国参与的 World Space Observatory Ultraviolet (WSO/UV)项目选用 Cesic[®]制备其三个主要设备,包括外框架结构、主板和框架,图 8^[10]给出了其集成后的结构,主板采用的是 Cesic[®]夹层结构。

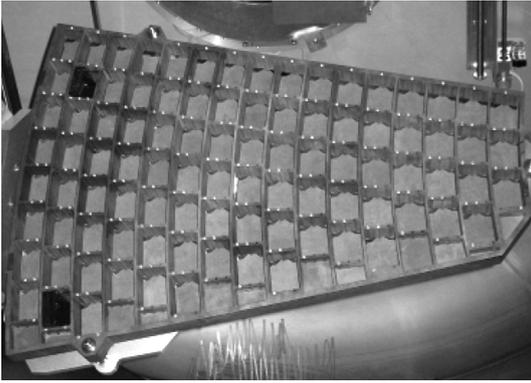


图 7 30°Cesic[®]翼瓣
Fig. 7 Cesic[®] 30 degree petal

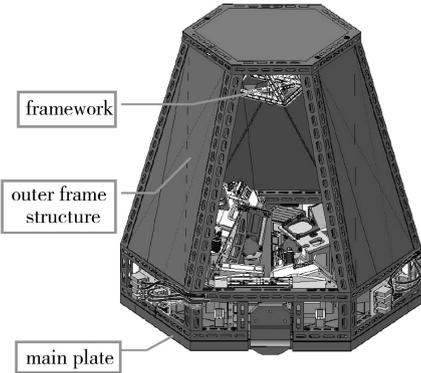


图 8 Cesic[®]整体集成结构
Fig. 8 Assembled spectrograph structure

2.2 日本

ASTRO-F (起初称为 IRIS) 是日本为实现天文红外望远镜第二个运载卫星任务,其采用 Ritchey-Chretien 型主镜,直径为 710 mm。镜体结构采用“三明治”夹层结构——主镜的芯部是厚度 3 mm 的低密度多孔 SiC,表面是厚度为 0.5 mm 的致密 CVD SiC 涂层,这种结构使得主镜只有 11 kg,而抛光后的表面准确度使得图像品质的衍射极限可达 5 μm。图 9^[11]给出了制造这种轻质“三明治”夹层结构 SiC 反射镜的工艺流程。继 ASTRO-F 之后,近年来,日本计划将采用 SiC 制备孔径为 3 m 的 SPICA 天文望远镜,在多种碳纤维增强碳化硅材料中,日本选用的是 ECM 和 MELCO 联合研发的 HB-Cesic[®],因为这种材料不但强度高,而且均质性和可重复性也很好。M. Suganuma 在 ICSO 2010 上撰文采用 HB-Cesic[®]制备了 Φ800 mm 的反射镜来验证设计和制造的合理性,

所有的工作均在日本宇航航空研究研发机构有关研制天文和地球观测的大型光学系统的框架内进行的。图 10^[12]给出了制备好的 Φ800 mm HB-Cesic[®]主镜的各部分结构。

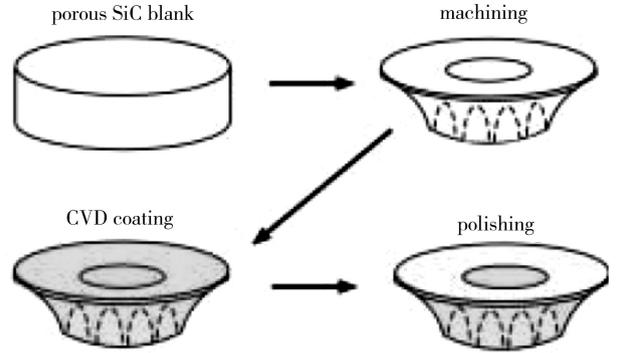


图 9 “三明治”夹层结构 SiC 反射镜的制备过程
Fig. 9 Fabrication of sandwich-type SiC mirror



(a) 主镜及其光具座的背部结构



(b) 主镜的光学支撑结构及组装好的光学结构

图 10 Φ800 mm 主镜各部分结构

Fig. 10 Structure of Φ800 mm primary mirror

2.3 荷兰

B. Harnisch 和 A. E. Marini^[13]等为了获得较轻的质量,去除了 ATLID 雷达(the European Atmospheric Lidar)抛物柱面反射镜(背部结构示意图如图 11^[14-17]所示)结构中一切不必要的材料,其中甚至包括平衡框架结构。

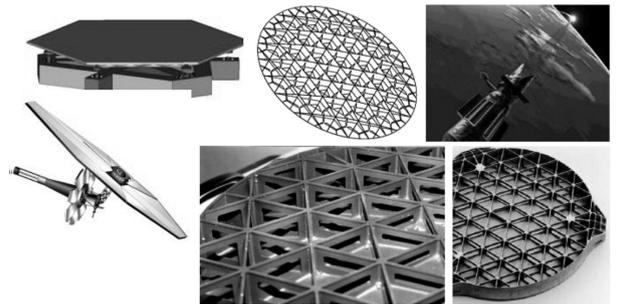


图 11 Φ800 mm ATLID 雷达望远镜
轻质 C/SiC 反射镜背部结构示意图

Fig. 11 Rear side of the 800 mm parabolic C/SiC mirror for a telescope application

背面三角格栅的边缘厚度也仅仅 1 mm,里面的切口也是目前最为复杂的陶瓷结构。反射镜设计的宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013 年 第 4 期

最大特征频率>400 Hz, 结构安全系数为 3.9 ~ 60 g 的静载荷。在 CVD SiC 涂层后, 反射镜的曲率半径没有变化, 质量也仅仅为 6.2 kg (面密度为 19 kg/m²)。

2.4 法国

Christophe Devilliers 等^[1] 采用 Cesium[®] 设计制造了韦布空间望远镜 (JWST) 上的近红外线光谱仪 (NIRspec) 的光具座, 在设计和尺寸选择时考虑到了 NIRspec 光具座的光学和发射载荷的限定条件以及 Cesium[®] 技术的制造能力, 选择其尺寸为 1 045 mm × 600 mm × 100 mm (图 12^[11])。设计者选用半封闭的背部结构设计, 这样光具座就可以获得最大的刚度; 可以在光具座的加强肋上挖出些孔洞来减轻质量; 可以使用带有接缝和孔洞的 C/C 坯体, 在渗硅后通过 EDM 和电腐蚀加工到最终的设计尺寸。

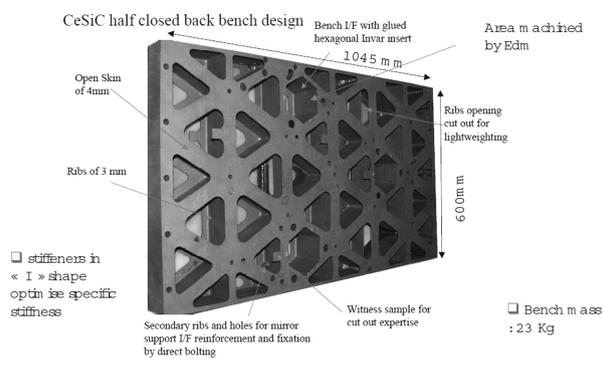


图 12 NIRspec 光具座示意图

Fig. 12 View of the manufactured structure

通过制造过程演示、机械和热物理性能表征, 他们得出的结论是 Cesium[®] 技术已经达到了制造复杂、严格、轻质、可靠空间结构所需要的技术成熟度, 借助这种技术可以快速低、成本地制造出各种大型空间应用设备和反射镜。

3 结语

目前, 在上海硅酸盐研究所、国防科技大学、西北工业大学、西安航天复合材料研究所和国内一些其他高校等单位的共同努力下, C/SiC 的制备技术和性能等方面都取得了长足的进步, 与世界先进水平的差距在逐步缩小, 但是, C/SiC 在光学系统上的应用研究才刚刚起步, 尚处于试验论证阶段, 远落后于德日美等国际先进水平, 有必要将其提上日程, 早日实现光学领域内高性能 C/SiC 复合材料的产业化生产。

参考文献

[1] Krödel M, Devilliers C. Cesium[®]-A new technology for lightweighted and cost-effective space instrument structures and mirrors [J]. Proceeding of SPIE, 5685 (OF) : 1-5
 [2] 马文礼, 沈忙作. 碳化硅轻型反射镜 [J]. 光学精密

工程, 1999, 7(2) : 8-12

[3] Papenburg U, Pfrang W, Kutter G S, et al. Optical and optomechanical ultra-lightweight C/SiC[®] components [C]// Part of the SPIE Conference on Optical Manufacturing and Testing III 1999, Denver, Colorado
 [4] Papenburg U. Advanced ultra-lightweight C/SiC mirrors and opto-mechanical structures [C]//8th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, SCI, 2004
 [5] Hamisch B, Kunkel B, Deyerler M, et al. Ultra-lightweight C/SiC mirrors and structures [J]. Eesa Bulletin, 1998
 [6] Krödel M R, Ozaki T. HB-CESIC composite for space optics and structures [C]//16th International Conference on Composite Materials
 [7] Krödel M R, Ozaki T, Kume M, et al. Manufacturing and performance test of a 800 mm space optic [C]. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=790700>
 [8] Krödel M R, Hofbauer P. Ultra-lightweight HB-CESIC[®] one-meter mirror demonstrator [C]. International Conference on Space Optics 2010, Rhodes, Greece
 [9] Kampf D, Erhard M, Bavdaz M, et al. Optical bench elements (petals) for IXO [C]. SPIE Giovanni Pareschi, 2009
 [10] Reutlinger A, Gál C, Brandt C, et al. Using Cesium for UV Spectrographs for The WSO/UV [C]. International Conference on Space Optics 2010, Rhodes, Greece
 [11] Kaneda H, Onaka T, Yamashiro R. Development of SiC mirror for ASTRO-F [C]. The Institute of Space and Astronautical Science. Report SP No. 14, 2000
 [12] Suganuma M, Imai T, Katayama H, et al. Optical testing of lightweight large all-C/SiC optics [C]. International Conference on Space Optics 2010, Rhodes, Greece
 [13] Marini A E. ATLID: The technology development programme for ESA's satellite-borne atmospheric lidar [J]. Eesa Bulletin, 1998
 [14] Papenburg U, Kunkel B, Billig V. C/SiC -a promising material for demanding applications in optics [C]. Space and Other Severe Environments. UN-Conference, New York, 1994
 [15] Kunkel B, et al. C/SiC-new material for earth observation sensor mirrors [C]// DLRG Symp., 1995
 [16] Pradier A, Papenburg U, Kunkel B, et al. C/SiC - an Ultralight weight structural material for optical components and further applications [C]//Intern. Symp. on Advanced Materials for Lightweight Structures, ESTEC-Proceeding, Noordwijk (NL), 1994
 [17] Müller C, Papenburg U, Goodman W A, et al. C/SiC high precision lightweight components for optomechanical applications [C]. SPIE Boston, 2000

(编辑 李洪泉)