

纤维增强碳化硅及其在光学反射镜中的应用

张巍 张舸 郭聪慧 范天扬 徐传享

Fiber-reinforced silicon carbide and its applications in optical mirrors

ZHANG Wei, ZHANG Ge, GUO Cong-hui, FAN Tian-yang, XU Chuan-xiang

引用本文:

张巍, 张舸, 郭聪慧, 范天扬, 徐传享. 纤维增强碳化硅及其在光学反射镜中的应用[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 695-704. doi: 10.37188/CO.2020-0052

ZHANG Wei, ZHANG Ge, GUO Cong-hui, FAN Tian-yang, XU Chuan-xiang. Fiber-reinforced silicon carbide and its applications in optical mirrors[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 695-704. doi: 10.37188/CO.2020-0052

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0052>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度变化对金属Ag膜反射镜偏振特性的影响研究

Influence of temperature variation on polarization characteristics of silver thin film mirror

中国光学. 2018, 11(4): 604 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0604>

纳米壳聚糖复合材料的制备与性能研究

Preparation and properties of nano-chitosan composites

中国光学. 2018, 11(5): 773 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0773>

紫外增强硅基成像探测器进展

Silicon-based ultraviolet photodetection: progress and prospects

中国光学. 2019, 12(1): 19 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0019>

低阶梯多级微反射镜高度误差分析及制作研究

Error analysis and fabrication of low-stepped mirrors

中国光学. 2019, 12(4): 791 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0791>

椭圆偏振光谱测量技术及其在薄膜材料研究中的应用

Spectroscopic ellipsometry and its applications in the study of thin film materials

中国光学. 2019, 12(6): 1195 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1195>

硅光子芯片外腔窄线宽半导体激光器

Narrow linewidth external cavity semiconductor laser based on silicon photonic chip

中国光学. 2019, 12(2): 229 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0229>

文章编号 2095-1531(2020)04-0695-10

纤维增强碳化硅及其在光学反射镜中的应用

张 巍^{1,2}, 张 舸^{1,2*}, 郭聪慧^{1,2}, 范天扬^{1,2}, 徐传享^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:纤维增强碳化硅复合材料具有优异的力学及热学性能被广泛应用在航空航天、核能、汽车、化工等诸多领域,特别是在光学反射镜方面有良好的应用前景。本文介绍了纤维增强碳化硅复合材料的特点以及其相对传统反射镜材料的优势,对比分析了不同纤维增强碳化硅复合材料制备工艺的优缺点,阐述了不同界面层对纤维的保护作用及对复合材料性能的影响,综述了国内外纤维增强碳化硅复合材料在光学反射镜领域的应用进展,最后总结了纤维增强碳化硅反射镜坯实现大规模应用所需进一步开展的研究方向。

关键词:碳化硅;复合材料;碳纤维;碳化硅纤维;反射镜

中图分类号:TB332 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2020-0052

Fiber-reinforced silicon carbide and its applications in optical mirrors

ZHANG Wei^{1,2}, ZHANG Ge^{1,2*}, GUO Cong-hui^{1,2}, FAN Tian-yang^{1,2}, XU Chuan-xiang^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese*

Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun 130033, China)*

** Corresponding author, E-mail: zhanggeciomp@126.com*

Abstract: Fiber-reinforced silicon carbide composites with excellent mechanical and thermal properties are widely used in aerospace, nuclear energy, automobile, chemical industry and many other fields, especially in optical mirrors. This paper introduces the characteristics of fiber-reinforced silicon carbide composites. The advantages and disadvantages of different preparation processes of fiber-reinforced silicon carbide composites are compared. The protective effects of different interface layers on fibers and composites are expounded. The application progress of fiber-reinforced silicon carbide composites in the field of optical mirrors at home and abroad is summarized. Finally, the research direction to be carried out for realizing large-scale application of fiber-reinforced silicon carbide mirror blanks is analyzed.

收稿日期:2020-03-30; 修订日期:2020-05-26

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFB0500100); 吉林省科技发展计划项目(No. 20190101019JH); 民用航天预研项目(No. D040101)

Supported by National Key Research and Development Program (No. 2016YFB0500100); Jilin Provincial Science and Technology Development Plan Project (No. 20190101019JH); Civil Aerospace Pre-research Project (No. D040101)

Key words: silicon carbide; composite materials; carbon fiber; silicon carbide fiber; optical mirrors

1 引言

21 世纪以来, 由于对地观测、深空探测等领域的迅猛发展, 对光电成像系统的观测能力提出了越来越高的要求^[1-2]。光学反射镜作为其中重要的组件, 得到了科研工作者的广泛关注。增加光学反射镜坯的口径是有效增加光电成像系统分辨率及探测能力的重要方法之一^[3-6]。然而, 光电载荷对于重量有严格限制, 此外, 需要确保系统能够在复杂的环境下正常工作。因此, 对于大口径光学反射镜材料的选择与制备提出了极为严苛的要求^[7-9]:

(1) 选择低密度轻量化材料, 其一方面能够满足空间遥感相机对载荷提出的低重量要求, 可以减少卫星发射成本, 另一方面可以减轻地基望远镜由于自重引起的镜面变形。

(2) 具备高比刚度及优异的综合力学性能。高比刚度能够避免反射镜自重、装配应力及卫星发射段的冲击振动等对镜面造成的影响, 同时高的断裂韧性也有利于实现光机功能一体化, 减少由于支撑部件与反射镜材料性能不匹配造成的应力积聚。

(3) 具有良好的热稳定性。空间相机及地基望远镜的服役温度环境恶劣, 材料的导热性能好、热膨胀系数低, 能减少反射镜热畸变, 保证光电成像系统的成像质量。

(4) 耐空间粒子辐照, 可延长空间反射镜材料的使用寿命。

(5) 材料的加工及制备成本低。

目前, 反射镜材料主要包括玻璃材料、低膨胀金属材料、陶瓷材料以及复合材料等^[10-12]。玻璃材料是第一代反射镜材料, 常用的有 ULE 和 ZEROUR 等。玻璃材料的热膨胀系数很低, 且光学加工性能优良, 但玻璃材料的热导率低, 比刚度较差。第二代反射镜材料是低膨胀金属材料, 主要包括 Al 和 Be 等, 金属材料的导热性能优良, 但热膨胀系数相对较大, 其面形精度容易受温度影响。同时 Al 的比刚度低, 而金属 Be 虽然比刚度较高但有毒, 对人体会产生致命损害, 因此, 在生产过程中需要有严格的安全措施。碳化硅材料^[13]

属于第三代反射镜材料。该材料化学稳定性好、耐空间粒子辐照性能优异、热膨胀系数低、弹性模量高, 且具有较好的导热性能。然而, 陶瓷材料较高的裂纹敏感性是限制其发展的重要瓶颈, 同时, 碳化硅材料的莫氏硬度很高, 导致材料加工难度大、成本高。为进一步提高反射镜材料的轻量化程度, 解决陶瓷材料脆性大的问题, 纤维增强碳化硅复合材料应运而生。该材料具有高强度、高模量、较高断裂韧性、较低的热膨胀系数、耐化学腐蚀及空间辐照、热导率高等优点, 且密度更低, 相比其他材料更能满足轻量化及高可靠性需求^[14-18]。

2 纤维增强碳化硅简介

碳化硅陶瓷材料的脆性使得其在应用过程中易产生灾难性脆断, 而纤维的引入能够有效延长裂纹扩展路径、降低碳化硅陶瓷基体对裂纹的敏感性、提高材料的断裂韧性。但纤维的长度、体积分数以及纤维的编织方式都会影响复合材料的性能^[19]。与此同时, 纤维的种类也会对复合材料的性能有很大影响, 目前用于纤维增强碳化硅复合材料的纤维主要有碳纤维和碳化硅纤维。相对碳化硅纤维来说, 碳纤维的制备成本较低且在国内发展较为成熟。碳化硅纤维增强碳化硅复合材料具有更高的抗弯强度及弹性模量, 同时可以显著提高材料的耐高温和抗高温氧化性能。但碳化硅纤维国内商业化生产尚不成熟, 成本较高, 且碳化硅纤维较脆, 编织困难, 这也成为目前限制其工业化发展的重要因素。

纤维增强碳化硅复合材料具有低密度、高强度、高模量、较高的断裂韧性、较低的热膨胀系数、优异的导热性能、耐高温性能、良好的抗高温氧化性能、耐空间辐照性能以及介电性能可调等优点。它的工作温度范围宽、使用寿命长, 可以在多个领域发挥重要作用^[20-23]。在空间光学反射镜领域, 利用其轻质高强、热膨胀系数低以及耐空间辐照的优点可实现反射镜的轻量化设计。在耐高温结构材料及热防护材料领域, 利用其耐高温及耐烧蚀的优点可以用于航空航天发动机的热端构件及航天飞行器的防热系统中。军事领域

中,该材料力学性能优异、介电性能可调,是良好的吸波隐身材料。在制备过程中添加 ZrC、ZrB₂ 等^[24] 或者在纤维表面制备抗氧化涂层可进一步提高材料的耐烧蚀性能。另外, C/SiC 刹车材料(碳陶)相对 C/C(碳碳)及其他刹车材料具有低密度、高强度、使用寿命长、摩擦系数高、摩擦性能更为稳定、耐高温氧化、以及对湿态和盐雾等外界环境不敏感等优点,被成功应用在飞机及高速列车上,很多高端赛车及高档轿车也有应用^[25-28]。

3 纤维增强碳化硅的制备工艺

目前,纤维增强碳化硅复合材料的制备工艺有很多,其中连续纤维增强碳化硅复合材料的制备方法主要分为以下几种^[29-30]:

(1) 先驱体浸渍裂解法(PIP)

该方法是将碳化硅的先驱体浸渍到纤维预制体中,先进行交联固化,随后在真空或者保护气中先驱体高温裂解成碳化硅基体。受先驱体陶瓷产率的限制,为得到致密的陶瓷基复合材料往往需要进行多次重复的浸渍裂解过程。常用的碳化硅先驱体主要有聚碳硅烷(PCS)、聚硅氧烷(PSO)以及聚甲基硅烷(PMS)等。

PIP 法裂解温度相对较低,可以在一定程度上减少纤维的损伤,同时易于制备结构复杂的构件。然而,通过该方法制备的材料易产生裂纹、孔隙率高,并且制备周期长。

(2) 化学气相渗透(CVI)

将纤维预制体置于沉积炉反应室中,加热到一定温度后(1000~1300 °C 左右)通入反应气体。反应气体在一定的负压作用下通过纤维预制体的空隙扩散到内部,随后气态先驱体发生裂解,

在纤维表面原位沉积碳化硅。随着沉积时间的延长,材料逐渐达到致密状态。CVI 法制备碳化硅基体最常见的先驱体为 CH₃SiCl₃(MTS)。

该方法制备出的陶瓷基复合材料基体纯度高,且易于制备形状复杂的构件。然而, CVI 沉积时间较长,这就大大延长了生产周期,增加了生产成本。由于 MTS 分子量较大,所以该方法通常用于制备薄壁构件。此种方法反应过程中副产物多,试验设备的保养与维护及反应副产物的处理需要投入较多成本。

(3) 反应浸渗(RI)

反应浸渗包括液相渗硅(LSI)和气相渗硅(VSI)两种方法。通常先用含碳的先驱体浸渍纤维预制体,之后高温裂解得到多孔的 C/C 中间体。也可以利用 SiC+C 的浆料浸渍纤维预制体得到 C/C-SiC 中间体。随后在 1400~1600 °C 以上高温下进行渗硅反应烧结。高温下熔融的液态硅或者硅蒸汽渗透到材料内部,与基体中的碳反应生成碳化硅基体。

该方法制备周期较短,可实现近净尺寸成型及制备形状复杂构件。然而,该方法得到的材料残硅量较多,会影响材料的性能。同时熔融的硅在与基体碳反应的过程中易与纤维发生反应,造成纤维的损伤。

(4) 纳米浸渍,瞬时共晶(NITE)

在碳化硅浆料中加入适量烧结助剂,浸渍纤维预制体。可以通过热压烧结的方法使复合材料致密化。该方法生产周期短、材料致密度高。然而,压力容易使纤维受到损伤,并且不适合制备形状复杂的构件。此外,烧结过程中通常会添加烧结助剂以降低烧结温度,这就使得碳化硅基体中残留大量杂质。不同方法的优缺点见表 1。

表 1 不同纤维增强碳化硅制备方法的优缺点对比

Tab. 1 Comparison of advantages and disadvantages of different preparation methods for fiber-reinforced silicon carbide

制备方法	优点	缺点
先驱体浸渍裂解法(PIP)	裂解温度低,纤维损伤小,可制备形状复杂构件	易产生裂纹,孔隙率高,生产周期长
化学气相渗透(CVI)	基体纯度高,可制备形状复杂构件	生产周期较长,成本高,不适合制备厚壁构件
反应浸渗(RI)	生产周期短,可制备形状复杂构件,近净尺寸成型	残硅量高,硅化反应造成纤维损伤
纳米浸渍,瞬时共晶(NITE)	致密度高,生产周期短	纤维易产生损伤,基体含杂质,不适合制备复杂形状构件

在光学反射镜材料领域,由于反射镜的结构较为复杂,所以通常采用前 3 种工艺或者多工艺相结合的方法。对于短纤维增强碳化硅陶瓷复合材料,可以将纤维均匀分散到碳化硅陶瓷浆料后进行成型烧结,或者将短切纤维制成纤维毡后再进行后续制备。

4 纤维增强碳化硅的界面问题

碳化硅材料对裂纹的敏感度很高,在有裂纹存在的情况下极易产生脆断,造成严重的结构破坏。而纤维的引入可使材料在断裂过程中,通过纤维拔出、纤维桥联及裂纹偏转等机制大大消耗裂纹尖端应力,从而极大地提高材料的断裂韧性。适当的界面结合更能够保证复合材料在断裂过程中充分发挥增韧效果。

提高纤维表面的润湿性是增加纤维与基体间界面结合力的有效方法之一。通过热处理或者化学方法对纤维表面进行除胶处理可提高纤维表面的粗糙度,增加纤维表面活性位点,从而改善纤维与基体间的润湿性。

考虑到碳化硅基体本身的弹性模量比较高,若界面结合强度过强,基体容易产生贯穿性开裂使得纤维难以充分发挥增韧作用,因此宜采用相对弱的界面结合强度。弱化界面的方法主要有界面层、多孔基体以及间隙界面^[31]。空间光学反射镜要求反射面具有较低的表面粗糙度,故采用界面层弱化结合界面的方法较为理想。

层状结构的界面层材料对于弱化界面结合力及提高复合材料的断裂韧性具有很好的效果^[32-34]。常用的材料主要有:热解碳(PyC)、BN 和 Ti_3SiC_2 等^[35-39],也可设计多层复合界面层,例如 $(PyC-SiC)_n$ (如图 1 所示)和 $(PyC-BN)_n$ 等^[40],或者在基体中添加适当组分,使材料在高温反应过程中可原位生成层状界面,如 Si-B-C-N 等。这些层状结构的界面材料可以有效地偏转裂纹,提高复合材料的断裂韧性。

在复合材料烧结过程中,渗硅反应或者基体中其他元素的作用容易对纤维造成一定程度的损伤。在纤维表面制备一层 SiC 界面层或者在原有界面层的基础上制备复合界面层可对纤维进行有效保护。

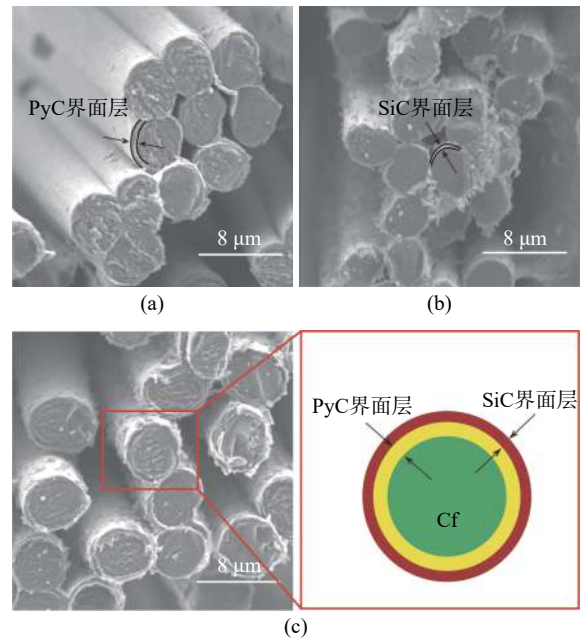


图 1 3 种不同的碳纤维界面层

Fig. 1 Three kinds of carbon fiber interface layers

在实际应用中,需要对反射镜坯体进行抛光、镀膜等一系列复杂的工序。因此,往往需要尽量选用与基体或增强相一致的界面层材料,以降低由于各组分硬度及热膨胀系数等差异对反射镜坯体后续加工的影响,减少后续加工难度及成本。

5 纤维增强碳化硅在光学反射镜领域的应用

5.1 国外纤维增强碳化硅反射镜的研究进展

国外纤维增强碳化硅反射镜发展较早,目前的制备工艺较为成熟。德国、日本、美国等国家已将 C/SiC 复合材料成功应用于光电成像系统,且反射镜背板的壁厚最低能够达到 1 mm 左右。

5.1.1 德国

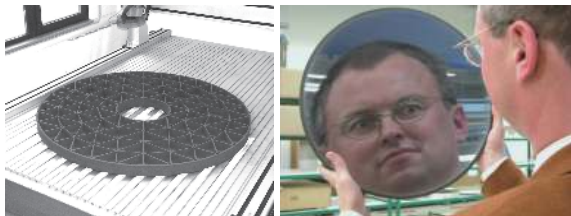
德国 ECM 公司商用化的 Cestic[®]^[41] 材料,以无序短切碳纤维毡为增强相,通过浸渍酚醛树脂、碳化、石墨化、渗硅反应烧结等工序得到近净尺寸成型的致密 C/SiC 反射镜坯。针对大口径及复杂形状反射镜坯,可利用粘接工艺将 C/C 素坯相连接(如图 2 所示),随后进行渗硅反应烧结。碳化的酚醛树脂与液相硅反应生成的碳化硅,可确保界面连接处与基体的组分基本一致。采用碳化硅浆料涂敷技术对反射镜坯表面进行处理,可

使通过后续加工的反射镜具有符合要求的表面粗糙度。Cesic[®]可利用传统的机械加工方法对 C/C 素坯进行研磨钻孔, 从而提高加工效率、大大降低了加工成本。该材料密度为 2.65 g/cm³, 弹性模量为 249 GPa, 更易实现轻量化。该公司利用 Cesic[®]材料^[42]成功制备出了可应用于 GREGOR 望远镜的 M1 (1.5 m), M2 (420 mm) 和 M3 (360 mm) 反射镜(如图 3 所示)。

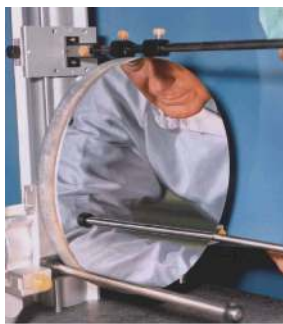


图 2 六部分连接组成的镜坯^[41]

Fig. 2 Mirror blank composed of six components^[41]



(a) GREGOR M1 背板
(a) Back structure of GREGOR M1 mirror
(b) GREGOR M2 抛光镜面
(b) Polished GREGOR M2 mirror



(c) GREGOR M3 抛光镜面
(c) Polished GREGOR M3 mirror

图 3 GREGOR 反射镜^[42]
Fig. 3 GREGOR mirror^[42]

ECM 与日本 MELCO 合作开发出的 HB-Cesic[®]材料更适合用于大口径反射镜坯的制造^[43]。HB-Cesic[®]对 Cesic[®]材料的 C/C 素坯制备工艺进行了改进, 采用高强与高模混合短切碳纤维毡, 使得复合材料均匀性更好, 抗弯强度和杨氏模量等性能

均有很大的提升, 并且该材料在制备过程中的收缩率仅为 0.6%±0.05%。

德国 IABG 公司^[44]制备的 C/SiC 反射镜, 以 Si-SiC 混合浆料进行涂敷, 使得 C/SiC 基体与表面涂覆层在很宽温度范围内能够达到热膨胀系数匹配。图 4 为 IABG 与 Asstrium GmbH 公司合作生产的利用 Si-SiC 混合浆料涂敷制备的 360 mm 口径的 C/SiC 反射镜。

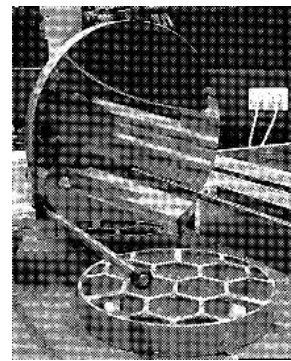
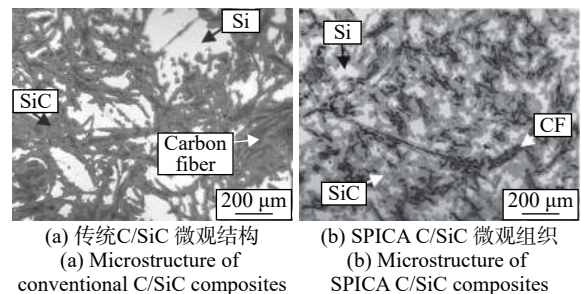


图 4 360 mm 口径 C/SiC 反射镜^[44]

Fig. 4 C/SiC mirror with diameter of 360 mm^[44]

5.1.2 日本

日本的 3.5 m 口径的 SPICA^[45]空间红外望远镜同样选用 C/SiC 复合材料。为了减少纤维与硅的反应, 他们将煤焦油沥青作为 C 的先驱体, 经过碳化、石墨化及后续的渗硅烧结后, 材料中 C_f 的体积分数仍高达 30% 以上。从图 5 的 SEM 对比图中可以明显看出, 采用煤焦油沥青作为先驱体可以使材料中的硅残余量大大降低, 碳化硅含量增多, 同时也减少了纤维与残余硅的反应。SPICA 所用的 C/SiC 复合材料的密度为 2.8 g/cm³, 抗弯强度为 200 MPa, 杨氏模量高达 320 GPa。



(a) 传统 C/SiC 微观结构
(a) Microstructure of conventional C/SiC composites
(b) SPICA C/SiC 微观组织
(b) Microstructure of SPICA C/SiC composites

图 5 传统 C/SiC 和 SPICA C/SiC 微观结构对比^[45]
Fig. 5 Comparison of microstructures for conventional C/SiC and SPICA C/SiC^[45]

5.1.3 美国

美国 Trex 公司开发出 T300HoneySiC™材料^[46]。T300HoneySiC™利用 T300 碳纤维作为增强相,通过环氧树脂浸渍、碳化后形成 C-C 蜂窝板 (CCH)。利用 PIP 方法不断浸渍裂解 SiC 先驱体 (SMP730),得到致密的 C/SiC 材料。该方法制备的反射镜成本低,并且达到了 7 kg/m^2 的面密度^[47],图 6 为 HoneySiC 镜坯基板雏形。

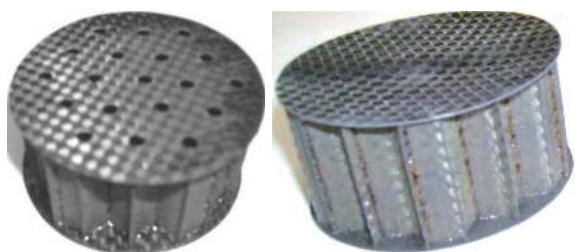


图 6 开孔式背板和弯曲式前面板^[47]

Fig. 6 Vented backside and curved front facesheet^[47]

美国 MER 公司采用 SiC 纤维制备出的 SiC-SiC^[48]复合材料的断裂韧性高达 $20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,弹性模量达 300 GPa ,如图 7 所示。该反射镜的面密度低至 6 kg/m^2 ,表面粗糙度优于 1 nm 。



图 7 美国 MER 公司生产的 SiC-SiC 反射镜^[48]

Fig. 7 SiC-SiC mirror produced by MER company^[48]

此外,欧洲航空航天局 ESA^[49]制备的 C/SiC 材料(图 8)的密度为 2.7 g/cm^3 ,抗弯强度达到 210 MPa ,被应用到 MSG 上的 SEVIRI 超轻扫描镜中。该反射镜尺寸为 $800 \text{ mm}\times 500 \text{ mm}$,重量仅为 7 kg 。

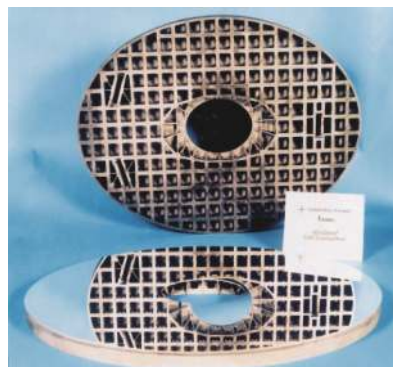


图 8 MSG 超轻扫描镜^[49]

Fig. 8 Ultra Lightweight Scanning Mirror (ULSM) for MSG^[49]

5.2 国内纤维增强碳化硅反射镜的研究进展

国防科技大学^[50]将短切碳纤维毡与树脂模压成型,通过 PIP 方法得到 C/C 素坯后进行机械加工,随后在 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 下渗硅烧结。图 9 为液硅浸渗烧结 (LSI) 得到的椭圆形 C/SiC 反射镜,大小为 $225 \text{ mm}\times 165 \text{ mm}$,厚度为 18 mm ,重量仅 0.41 kg 。其背板形状如图 9(a)所示,筋厚为 2 mm ,面密度为 14 kg/m^2 。通过 CVD 方法对反射镜表面在 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 下沉积了 $150 \text{ }\mu\text{m}$ 的 SiC 涂层,之后进行精密抛光,效果如图 9(b)所示。

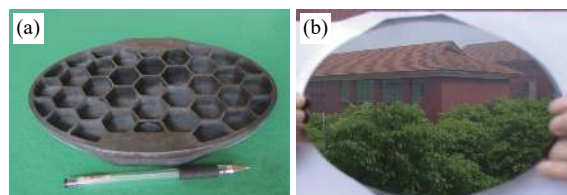


图 9 LSI 得到的椭圆形 C/SiC 反射镜^[50]

Fig. 9 Oval C/SiC mirror obtained by LSI^[50]

此外国防科技大学^[51]还采用 SiC 纤维毡作为增强相,通过 CVI+PIP+LSI 方法成功制备出了 SiC/SiC 反射镜材料。

国内,上海硅酸盐研究所、西北工业大学、中南大学等也对 C/SiC 复合材料的研制和性能开发进行了研究,但对于空间光学反射镜领域的工程化应用涉及较少。

6 结束语

未来光学反射镜坯会向着更大、更轻、更强

的方向发展。采用大口径反射镜所导致的质量载荷增加、装调困难、易产生裂纹等问题亟待解决。采用纤维增强碳化硅复合材料能够在保证较高的比刚度的同时降低材料密度、提升材料的断裂韧性、降低裂纹敏感性。然而,国内纤维增强碳化硅材料在反射镜领域的应用研究与国外相比仍有较大差距,纤维增强碳化硅反射镜坯的大规模应用仍有技术壁垒。综上所述,将纤维增强碳化硅材料成功应用于制作大口径光学反射镜还需开展以下研究:

(1)实现大口径反射镜坯的近净尺寸成型,减少材料制备过程中残余应力引起的裂纹;

(2)光机功能结构一体化成型设计,避免在环境变化过程中由于装调产生的材料性能不匹配造成应力积聚;

(3)合理的大口径反射镜轻量化结构设计,从结构角度进一步降低光学反射镜面密度;

(4)纤维表面制备合适的界面层,充分发挥纤维强韧化作用;

(5)降低反射镜材料的加工及制备成本,缩短制备周期;

(6)采用合适的表面涂敷技术,达到更好的光学表面质量以满足光电成像系统要求。

参考文献:

- [1] 徐宏,关英俊.空间相机1m口径反射镜组件结构设计[J].*光学精密工程*,2013,21(6):1488-1495.
XU H, GUAN Y J. Structural design of 1m diameter space mirror component of space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1488-1495. (in Chinese)
- [2] 贾建禄,王建立,赵金宇,等.可扩展式自适应光学系统波前处理器的硬件设计[J].*液晶与显示*,2011,26(3):370-373.
JIA J L, WANG J L, ZHAO J Y, et al.. Hardware design for extendible adaptive optics system wave-front processor[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 370-373. (in Chinese)
- [3] 李志来,徐宏,关英俊.1.5m口径空间相机主镜组件的结构设计[J].*光学精密工程*,2015,23(6):1635-1641.
LI ZH L, XU H, GUAN Y J. Structural design of 1.5 m mirror subassembly for space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1635-1641. (in Chinese)
- [4] 张景旭.地基大口径望远镜系统结构技术综述[J].*中国光学*,2012,5(4):327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [5] 陈浩,宣丽,胡立发,等.望远镜的紧凑型闭环液晶自适应光学系统设计[J].*液晶与显示*,2010,25(3):379-385.
CHEN H, XUAN L, HU L F, et al.. Design on compact type closed-loop liquid crystal adaptive optical system for telescope[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(3): 379-385. (in Chinese)
- [6] 宣丽,李大禹,刘永刚.液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望[J].*液晶与显示*,2015,30(1):1-9.
XUAN L, LI D Y, LIU Y G. Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 1-9. (in Chinese)
- [7] 张德珂,曹英斌,刘荣军,等.C/SiC复合材料空间光机结构的研究进展与展望[J].*材料导报*,2012,26(13):7-11.
ZHANG D K, CAO Y B, LIU R J, et al.. Progress and prospect of C/SiC composites used in space opto-mechanical structures[J]. *Materials Review*, 2012, 26(13): 7-11. (in Chinese)
- [8] 张学军,李志来,张忠玉.基于SiC材料的空间相机非球面反射镜结构设计[J].*红外与激光工程*,2007,36(5):577-582.
ZHANG X J, LI ZH L, ZHANG ZH Y. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 577-582. (in Chinese)
- [9] 董吉洪.大孔径光学反射镜球铰支撑设计与分析[J].*光机电信息*,2010,27(9):29-34.
DONG J H. Ball hinge support design and analysis for large aperture optical mirror[J]. *OME Information*, 2010, 27(9): 29-34. (in Chinese)
- [10] 刘韬,周一鸣,江月松.国外空间反射镜材料及应用分析[J].*航天返回与遥感*,2013,34(5):90-99.

- LIU T, ZHOU Y M, JIANG Y S. Research and application of foreign space mirror materials[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(5): 90-99. (in Chinese)
- [11] 王永杰, 解永杰, 马臻, 等. 空间反射镜新材料研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(4): 143-147, 153.
WANG Y J, XIE Y J, MA ZH, *et al.*. Research progress of new space mirror materials[J]. *Materials Review*, 2016, 30(4): 143-147, 153. (in Chinese)
- [12] 黄禄明, 张长瑞, 刘荣军, 等. C/SiC复合材料轻型反射镜光学改性涂层技术研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(5): 1514-1519.
HUANG L M, ZHANG CH R, LIU R J, *et al.*. Progress of the preparation of C/SiC composites and coatings used in space mirror[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(5): 1514-1519. (in Chinese)
- [13] EALEY M A, WEAVER G Q. Developmental history and trends for reaction-bonded silicon carbide mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2857: 66-72.
- [14] 张舸, 赵汝成, 赵文兴. 空间用反应烧结碳化硅反射镜坯体制备技术研究[J]. 空间科学学报, 2011, 31(3): 401-405.
ZHANG G, ZHAO R CH, ZHAO W X. Study on fabrication technology of reaction bonded silicon carbide mirror blank for space[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, 31(3): 401-405. (in Chinese)
- [15] 黄禄明, 张长瑞, 刘荣军, 等. C/SiC复合材料反射镜研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(6): 26-29.
HUANG L M, ZHANG CH R, LIU R J, *et al.*. Process of C/SiC composites used in space mirror[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2016, 46(6): 26-29. (in Chinese)
- [16] 张玉娣, 张长瑞, 周新贵, 等. SiC基反射镜制备工艺研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2005, 24(1): 89-93.
ZHANG Y D, ZHANG CH R, ZHOU X G, *et al.*. Development of process to fabricate SiC mirror[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2005, 24(1): 89-93. (in Chinese)
- [17] ZHANG G, ZHAO R CH, ZHAO W X, *et al.*. Manufacture of $\Phi 1.2\text{m}$ reaction bonded silicon carbide mirror blank CFID[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7654: 76541B.
- [18] 任建岳, 陈长征, 何斌, 等. SiC和SiC/Al在TMA空间遥感器中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2537-2543.
REN J Y, CHEN CH ZH, HE B, *et al.*. Application of SiC and SiC/Al to TMA optical remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2537-2543. (in Chinese)
- [19] 李双, 张宇民, 韩杰才, 等. 反应烧结碳化硅中碳短纤维的形貌及增强作用[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(7): 916-922.
LI SH, ZHANG Y M, HAN J C, *et al.*. Morphology and reinforcing behavior of short carbon fiber in reaction bonded silicon carbide[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41(7): 916-922. (in Chinese)
- [20] 马青松, 刘海韬, 潘余, 等. C/SiC复合材料在超燃冲压发动机中的应用研究进展[J]. 无机材料学报, 2013, 28(3): 247-255.
MA Q S, LIU H T, PAN Y, *et al.*. Research progress on the application of C/SiC composites in scramjet[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2013, 28(3): 247-255. (in Chinese)
- [21] 何柏林, 孙佳. 碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(6): 1197-1202, 1207.
HE B L, SUN J. Progress and application of carbon fibers reinforced silicon carbide ceramic matrix composites[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 28(6): 1197-1202, 1207. (in Chinese)
- [22] 刘海韬. 夹层结构SiCf/SiC雷达吸波材料设计、制备及性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010
LIU H T. Design, Preparations and properties of the SiCf/SiC radar absorbing materials with sandwich structures[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [23] 王鸣, 董志国, 张晓越, 等. 连续纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用[J]. 航空制造技术, 2014(6): 10-13.
WANG M, DONG ZH G, ZHANG X Y, *et al.*. Application of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites in aeroengine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(6): 10-13. (in Chinese)
- [24] CHEN X W, DONG S M, KAN Y M, *et al.*. 3D C_f/SiC-ZrC-ZrB₂ composites fabricated via sol-gel process combined with reactive melt infiltration[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, 36(15): 3607-3613.
- [25] 徐兴亚, 张立同, 成来飞, 等. 碳陶刹车材料的研究进展[J]. 航空制造技术, 2014(6): 100-103, 108.
XU X Y, ZHANG L T, CHENG L F, *et al.*. Research progress of carbon/silicon carbide brake materials[J].

- Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(6): 100-103, 108. (in Chinese)
- [26] 黄飞虎, 王思青, 张长瑞, 等. 高性能刹车材料的研究现状与发展趋势[J]. *材料导报*, 2012, 26(19): 59-63.
HUANG F H, WANG S Q, ZHANG CH R, *et al.*. A review of advanced brake disc materials[J]. *Materials Review*, 2012, 26(19): 59-63. (in Chinese)
- [27] ZHOU X, ZHU D M, XIE Q, *et al.*. Friction and wear properties of C/C-SiC braking composites[J]. *Ceramics International*, 2012, 38(3): 2467-2473.
- [28] FAN S W, ZHANG L T, CHENG L F, *et al.*. Wear mechanisms of the C/SiC brake materials[J]. *Tribology International*, 2011, 44(1): 25-28.
- [29] 王洪磊. 反应浸渗制备连续纤维增强 SiC 基复合材料及其性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
WANG H L. Fabrication and performance of continuous fiber-reinforced silicon carbide matrix composites by reaction infiltration[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [30] 孙明, 史一宁, 邱海鹏, 等. PIP法制备陶瓷基复合材料构件的弯曲性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(S1): 631-634.
SUN M, SHI Y N, QIU H P, *et al.*. Studies of flexural strength of ceramic matrix composite component prepared by PIP process[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(S1): 631-634. (in Chinese)
- [31] 张立同. 纤维增韧碳化硅陶瓷复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
ZHANG L T. *Fiber-reinforced Silicon Carbide Ceramic Composites*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [32] LIU H T, TIAN H. Mechanical and microwave dielectric properties of SiCf/SiC composites with BN interphase prepared by dip-coating process[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, 32(10): 2505-2512.
- [33] UDAYAKUMAR A, GANESH A S, RAJA S, *et al.*. Effect of intermediate heat treatment on mechanical properties of SiC_f/SiC composites with BN interphase prepared by ICVI[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31(6): 1145-1153.
- [34] MU Y, ZHOU W CH, LUO F, *et al.*. Effects of BN/SiC dual-layer interphase on mechanical and dielectric properties of SiC_f/SiC composites[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(2): 3411-3418.
- [35] UDAYAKUMAR A, STALIN M, VENKATESWARLU K. Effect of CVD SiC seal coating on the mechanical properties of C_f/SiC composites generated through CVI[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 219: 75-81.
- [36] YIN X W, HE SH SH, ZHANG L T, *et al.*. Fabrication and characterization of a carbon fibre reinforced carbon-silicon carbide-titanium silicon carbide hybrid matrix composite[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(3): 835-841.
- [37] LI H J, OUYANG H B, QI L H, *et al.*. Effect of temperature on the synthesis of SiC coating on carbon fibers by the reaction of SiO with the deposited pyrolytic carbon layer[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2010, 26(3): 211-216.
- [38] 周新贵, 游宇, 于海蛟, 等. 碳纤维CVD SiC涂层对C/SiC复合材料力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(S1): 32-35.
ZHOU X G, YOU Y, YU H J, *et al.*. Effects of carbon fiber CVD SiC coatings on mechanical properties of C/SiC composites[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(S1): 32-35. (in Chinese)
- [39] SHIMODA K, PARK J S, HINOKI T, *et al.*. Influence of pyrolytic carbon interface thickness on microstructure and mechanical properties of SiC/SiC composites by NITE process[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 68(1): 98-105.
- [40] JIA Y, LI K ZH, XUE L ZH, *et al.*. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon fiber reinforced multilayered (PyC-SiC)_n matrix composites[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(1): 986-988.
- [41] KROEDEL M, KUTTER G S, DEYERLER M, *et al.*. Short carbon-fiber-reinforced ceramic-Cesic-for optomechanical applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4771: 230-242.
- [42] KROEDEL M R, LICHTSCHEINDL J. Cestic: manufacturing study for next generation telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5494: 352-355.

- [43] KRÖDEL M R, OZAKI T. HB-Cesic composite for space optics and structures[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6666: 66660E.
- [44] MUELLER C E, PAPPENBURG U, GOODMAN W A, *et al.*. C/SiC high-precision lightweight components for optomechanical applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4198: 249-259.
- [45] OZAKI T, KUME M, OSHIMA T, *et al.*. Mechanical and thermal performance of C/SiC composites for SPICA mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5868: 58680H.
- [46] GOODMAN W A. HoneySiC: a new optomechanical material for low-areal cost and density[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8837: 88370F.
- [47] GOODMAN W A, NEJHAD M N C, WRIGHT S, *et al.*. T300HoneySiC: a new near-zero CTE molded C/SiC material[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9574: 95740E.
- [48] KOWBEL W, WOIDA R, WITHERS J C. SiC-SiC composites for optical applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 5868: 586808.
- [49] HARNISCH B, KUNKEL B, DEYERLER M, *et al.*. Ultra-lightweight C/SiC mirrors and structures[J]. *Esa Bulletin*, 1998, 95(8): 148-152.
- [50] ZHOU H, ZHANG CH R, CAO Y B, *et al.*. Lightweight C/SiC mirrors for space application[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6148: 61480L.
- [51] 司亚凯. SiC_f/SiC 复合材料反射镜坯体的制备与性能研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
SI Y K. Study on preparation and performance of SiC_f/SiC reflecting mirror composite[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)

作者简介:



张 巍(1994—), 女, 吉林吉林人, 硕士, 研究实习员, 2016年、2018年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料制备技术方面的研究。
E-mail: zhangwei_hit2017@163.com



张 舸(1980—), 男, 重庆荣昌人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 2003年于长春理工大学获得学士学位, 2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事碳化硅陶瓷及其复合材料制备技术的研究。E-mail: zhanggeciomp@126.com