



先驱体转化陶瓷纤维与复合材料丛书

碳化硅复合材料反射镜 及支撑结构材料

Silicon Carbide Composite Mirrors and
Supporting Structure Materials

刘荣军 王衍飞 张长瑞 曹英斌 著



非外借



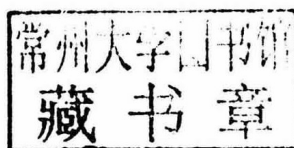
科学出版社

先驱体转化陶瓷纤维与复合材料丛书

碳化硅复合材料反射镜 及支撑结构材料

Silicon Carbide Composite Mirrors and
Supporting Structure Materials

刘荣军 王衍飞 张长瑞 曹英斌 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

C 纤维增强的 SiC 陶瓷基复合材料(C/SiC)是 21 世纪初逐步发展起来的一类新型空间光机结构材料,适合制备大口径光学反射镜和支撑结构,是新型高分辨率空间相机光机结构材料的发展方向之一。

本书简要介绍了空间光机结构材料的发展现状,C/SiC 复合材料光学反射镜及支撑结构材料的性能特点和研究现状,并在此基础上,总结作者十余年来在 SiC 复合材料反射镜及支撑结构材料技术领域研究成果,主要介绍轻质 C/SiC 复合材料反射镜设计与制备技术、C/SiC 复合材料残余应力测量与控制技术、近零膨胀 C/SiC 复合材料支撑结构设计与制备技术等内容。

本书可作为从事先进陶瓷及陶瓷基复合材料教学和科研工作的高等院校教师、从事相关产品开发和生产的技术人员、从事相关设计和应用的总体部门人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

碳化硅复合材料反射镜及支撑结构材料 / 刘荣军等著. —北京: 科学出版社, 2019.7
(先驱体转化陶瓷纤维与复合材料丛书)
ISBN 978-7-03-061869-6

I. ①碳… II. ①刘… III. ①碳化硅纤维—陶瓷复合材料—研究 IV. ①TQ174.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 139349 号

责任编辑: 徐杨峰 / 责任校对: 谭宏宇
责任印制: 黄晓鸣 / 封面设计: 殷 靓

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版
江苏凤凰数码印务有限公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)
2019 年 7 月第一次印刷 印张: 17 1/2
字数: 300 000

定价: 115.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

先驱体转化陶瓷纤维与复合材料丛书

编辑委员会

主 编 王 军

副主编 程海峰 王 浩

编 委	陈朝辉	张长瑞	肖加余	宋永才
	王应德	周新贵	冯 坚	刘荣军
	简 科	李 斌	余金山	刘海韬
	邵长伟	马青松		

丛 书 序

在陶瓷基体中引入第二相复合形成陶瓷基复合材料,可以在保留单体陶瓷低密度、高强度、高模量、高硬度、耐高温、耐腐蚀等优点的基础上,明显改善单体陶瓷的本征脆性,提高其损伤容限,从而增强抗力、热冲击的能力,还可以赋予单体陶瓷新的功能特性,呈现出“ $1+1>2$ ”的效应。以碳化硅(SiC)纤维为代表的陶瓷纤维在保留单体陶瓷固有特性的基础上,还具有大长径比的典型特征,从而呈现出比块体陶瓷更高的力学性能以及一些块体陶瓷不具备的特殊功能,是一种非常适合用于对单体陶瓷进行补强增韧的第二相增强体。因此,陶瓷纤维和陶瓷基复合材料已经成为航空航天、武器装备、能源、化工、交通、机械、冶金等领域的共性战略性原材料。

制备技术的研究一直是陶瓷纤维与陶瓷基复合材料研究领域的重要内容。1976年,日本东北大学 Yajima 教授通过聚碳硅烷转化制备出 SiC 纤维,并于 1983 年实现产业化,从而开创了有机聚合物制备无机陶瓷材料的新技术领域,实现了陶瓷材料制备技术的革命性变革。多年来,由于具有成分可调且纯度高、可塑性成型、易加工、制备温度低等优势,陶瓷先驱体转化技术已经成为陶瓷纤维、陶瓷涂层、多孔陶瓷、陶瓷基复合材料的主流制备技术之一,受到世界各国的高度重视和深入研究。

20 世纪 80 年代初,国防科技大学在国内率先开展陶瓷先驱体转化制备陶瓷纤维与陶瓷基复合材料的研究,并于 1998 年获批设立新型陶瓷纤维及其复合材料国防科技重点实验室(Science and Technology on Advanced Ceramic Fibers and Composites Laboratory,简称 CFC 重点实验室)。三十多年来,CFC 重点实验室在陶瓷先驱体设计与合成、连续 SiC 纤维、氮化物透波陶瓷纤维及复合材料、纤维增强 SiC 基复合材料、纳米多孔隔热复合材料、高温隐身复合材料等方向取

得一系列重大突破和创新成果,建立了以先驱体转化技术为核心的陶瓷纤维和陶瓷基复合材料制备技术体系。这些成果原创性强,丰富和拓展了先驱体转化技术领域的内涵,为我国新一代航空航天飞行器、高性能武器系统的发展提供了强有力的支撑。

CFC 重点实验室与科学出版社合作出版的“先驱体转化陶瓷纤维与复合材料丛书”,既是对实验室过去成绩的总结、凝练,也是对该技术领域未来发展的一次深入思考。相信这套丛书的出版,能够很好地普及和推广先驱体转化技术,吸引更多科技工作者以及应用部门的关注和支持,从而促进和推动该技术领域长远、深入、可持续的发展。

中国工程院院士

北京理工大学教授

2016年9月28日

前 言

SiC 陶瓷基复合材料,主要是指采用纤维增强的 SiC 基复合材料,通常采用的增强纤维为 C 纤维。C/SiC 复合材料具有高比强度、高比模量、低膨胀、耐腐蚀、抗辐射等优异的物理和化学性能,是 21 世纪初逐步发展起来的一类新型空间光机结构材料,适合制备大口径光学反射镜和支撑结构,能有效提高卫星的有效载荷,是新型高分辨率空间相机光机结构材料的发展方向之一。

本书基于新型陶瓷纤维及其复合材料国防科技重点实验室十多年来在 C/SiC 复合材料光学反射镜及支撑结构方面的研究积累,较为系统地介绍了空间光机结构材料的发展现状、C/SiC 复合材料光学反射镜及支撑结构材料的性能特点、C/SiC 复合材料反射镜设计与制备技术、C/SiC 复合材料支撑结构设计及制备技术。C/SiC 复合材料反射镜设计与制备技术包括: C/SiC 复合材料反射镜结构设计技术、C/SiC 复合材料光学反射镜坯体制备技术、梯度过渡层制备技术、光学改性涂层制备技术、反射镜坯体应力控制技术等。C/SiC 复合材料支撑结构制备技术包括: 近零膨胀 C/SiC 复合材料设计技术、近零膨胀 C/SiC 复合材料制备工艺和 C/SiC 支撑结构(镜筒)制备技术等。

本书内容是作者所在团队在 C/SiC 复合材料反射镜及支撑结构技术科研实践中的积累与总结,由刘荣军、王衍飞、张长瑞和曹英斌共同编写。书中融入了周浩、张玉娣、于坤的博士学位论文研究成果和王静、张德珂、黄禄明的硕士学位论文研究成果,严春雷博士在书稿和参考文献整理方面付出了辛勤劳动,在此一并表示感谢。

作者希望通过本书的介绍能使科研技术人员对 C/SiC 空间光机结构材料的特点、优势、制备技术有较为全面地了解,对空间光机结构材料的发展现状与趋势有较为准确地把握,从而为新型高分辨率空间相机的结构设计、选材、制备等提供指导与帮助。

刘学军

2019 年 4 月 28 日

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高分辨空间相机对光学反射镜材料性能要求	3
1.1.1 空间相机对反射镜材料力学性能的要求	3
1.1.2 空间相机对反射镜材料热物理性能的要求	4
1.1.3 空间相机对反射镜材料光学性能的要求	4
1.2 轻质光学反射镜材料与轻量化结构研究现状	5
1.2.1 轻质光学反射镜材料发展现状	5
1.2.2 SiC 及其复合材料反射镜轻量化结构研究现状	7
1.3 SiC 陶瓷反射镜的制备及其应用进展	9
1.3.1 SiC 陶瓷反射镜的制备工艺	9
1.3.2 SiC 陶瓷反射镜的应用进展	13
1.4 C/SiC 复合材料反射镜制备及其应用进展	15
1.4.1 C/SiC 复合材料反射镜的特点及优势	15
1.4.2 C/SiC 复合材料反射镜坯的制备工艺	16
1.4.3 C/SiC 复合材料反射镜的应用	18
1.5 光学支撑结构材料研究现状	20
1.5.1 光学支撑结构材料应用背景	20
1.5.2 低膨胀光学支撑结构材料发展现状	21
1.5.3 C/SiC 复合材料支撑结构的应用	27

第 2 章 轻质 C/SiC 复合材料及其反射镜的设计	31
2.1 反射镜表面光学特征与 CVD SiC 表面涂层的设计	31
2.1.1 反射镜表面光学特性与材料表面性质的关系	31
2.1.2 各种工艺方法制备的 SiC 材料的光学特性	37
2.1.3 CVD SiC 涂层的工艺设计	38
2.2 C/SiC 复合材料反射镜轻量化和加工要求与反射镜坯体的设计	39
2.2.1 反射镜轻量化和加工对坯体的要求	39
2.2.2 C/SiC 复合材料反射镜坯的轻量化和可加工特性	40
2.2.3 C/SiC 复合材料反射镜坯体蜂窝夹芯结构的设计	41
2.2.4 C/SiC 复合材料反射镜坯体的工艺设计	44
2.3 C/SiC 复合材料反射镜的结构设计	46
2.3.1 CVD SiC 涂层和 C/SiC 坯体界面应力分析	46
2.3.2 梯度过渡层的设计	49
第 3 章 C/SiC 复合材料反射镜坯体的制备	51
3.1 气相渗硅 C/SiC 复合材料制备技术	51
3.1.1 气相渗硅技术原理	51
3.1.2 工艺参数对 C/SiC 复合材料性能的影响	52
3.2 C/C 复合材料组成与结构对气相渗硅 C/SiC 复合材料性能的影响	68
3.2.1 C/C 孔隙率对 C/SiC 复合材料组成和密度的影响	68
3.2.2 C/C 孔隙率对 C/SiC 复合材料力学性能的影响	69
3.2.3 C/C 孔隙率对 C/SiC 复合材料热学性能的影响	70
第 4 章 C/SiC 复合材料反射镜表面致密光学涂层制备	72
4.1 CVD SiC 涂层原理与制备工艺	72
4.1.1 CVD SiC 涂层原理	72
4.1.2 工艺参数对 SiC 涂层沉积过程的影响	75
4.2 CVD SiC 涂层组成及结构	88

4.2.1	沉积温度对 CVD SiC 涂层组成及结构的影响	88
4.2.2	稀释气体对 CVD SiC 涂层组成及结构的影响	92
4.2.3	系统压力对 CVD SiC 涂层组成及结构的影响	96
4.3	CVD SiC 涂层的性能	97
4.3.1	CVD SiC 涂层的密度	98
4.3.2	CVD SiC 涂层的弹性模量及显微硬度	98
4.3.3	CVD SiC 涂层的光学加工性能	99
第 5 章	C/SiC 复合材料反射镜梯度过渡层制备	101
5.1	梯度过渡层预涂层成型方法	101
5.1.1	浆料涂刷法	101
5.1.2	注浆成型法	102
5.1.3	凝胶注模法	102
5.2	凝胶注模 Si-SiC 预涂层成型工艺研究	102
5.2.1	高固含量高流动性浆料的配制	103
5.2.2	凝胶反应工艺优化	108
5.2.3	凝胶素坯的干燥行为	112
5.2.4	凝胶素坯的密度及力学性能	116
5.3	气相渗硅烧结的 Si-SiC 涂层组成、结构及性能研究	121
5.3.1	Si-SiC 涂层的组成与结构研究	122
5.3.2	Si-SiC 涂层的力学性能研究	129
5.3.3	Si-SiC 涂层的热物理性能研究	132
5.4	C/SiC 坯体表面 Si-SiC 梯度过渡层的制备	134
5.4.1	一步法渗硅烧结成型工艺	134
5.4.2	二步法渗硅烧结成型工艺	136
5.4.3	Si-SiC 梯度过渡层与 C/SiC 坯体的结合性能	137
5.4.4	Si-SiC 梯度过渡层与 CVD SiC 涂层的结合性能	138
第 6 章	C/SiC 复合材料残余应力测量与控制技术	139
6.1	残余应力对反射镜面形精度的影响	139

6.2	C/SiC 复合材料的残余应力类型和残余应力消除工艺	140
6.2.1	C/SiC 复合材料的残余应力类型	140
6.2.2	C/SiC 复合材料的残余应力消除工艺	141
6.3	C/SiC 复合材料的结构应力研究	141
6.3.1	工艺、相组成与 C/SiC 复合材料结构应力的关系研究	141
6.3.2	C/SiC 复合材料结构应力的拉曼法研究	145
6.4	C/SiC 复合材料加工应力的 X 射线衍射研究	149
6.4.1	X 射线衍射 $\sin^2\psi$ 法的残余应力计算	149
6.4.2	X 射线衍射 $\sin^2\psi$ 法的测量参数选取	151
6.4.3	C/SiC 复合材料的表面加工工艺和去应力退火工艺	153
6.4.4	去应力退火前后 C/SiC 复合材料磨削应力的变化 研究	157
6.4.5	去应力退火前后 C/SiC 复合材料研磨应力的变化 研究	161
6.4.6	C/SiC 复合材料的表面加工方式	165
第 7 章	轻质 C/SiC 复合材料反射镜的制备技术研究	166
7.1	小尺寸 C/SiC 反射镜试样制备研究	166
7.1.1	小尺寸 C/SiC 反射镜坯制备	166
7.1.2	C/SiC 复合材料反射镜光学抛光研究	167
7.2	中等尺寸 C/SiC 反射镜的制备	168
7.2.1	实心结构椭圆反射镜	168
7.2.2	底部开孔结构椭圆反射镜	168
7.2.3	蜂窝夹芯结构高能激光反射镜	171
7.2.4	圆形能动镜	172
7.3	大尺寸 C/SiC 反射镜的制备	174
7.3.1	尺寸稳定性	174
7.3.2	$\phi 600$ mm 口径 C/SiC 反射镜坯体的制备	175
7.3.3	米级尺寸 C/SiC 反射镜坯体的制备	178
7.4	C/SiC 复合材料反射镜研究展望	180

第 8 章 近零膨胀先驱体浸渍裂解 C/SiC 复合材料热膨胀行为研究	181
8.1 空间光机支撑结构对近零膨胀材料的要求	181
8.2 单向纤维增强 C/SiC 复合材料的热膨胀性能	182
8.2.1 单向纤维增强 C/SiC 复合材料纵向热膨胀行为	183
8.2.2 单向纤维增强 C/SiC 复合材料横向热膨胀行为	185
8.2.3 C 纤维体积分数对 C/SiC 复合材料热膨胀系数的影响	185
8.3 编织结构 C/SiC 复合材料的热膨胀性能	187
8.3.1 编织结构对 C/SiC 复合材料密度、孔隙率的影响	187
8.3.2 编织结构对 C/SiC 复合材料力学性能的影响	189
8.3.3 不同编织结构 C/SiC 复合材料的纵向热膨胀性能	192
8.3.4 不同编织结构 C/SiC 复合材料的横向热膨胀性能	194
8.4 编织纱线细度对 C/SiC 复合材料热膨胀性能的影响	196
8.4.1 不同纱线细度五向纱的 3D5d C/SiC 复合材料热膨胀性能	197
8.4.2 不同纱线细度编织纱的 3D5d C/SiC 复合材料热膨胀性能	198
8.5 PIP 周期对 C/SiC 复合材料热膨胀性能的影响	199
8.5.1 SiC 体积分数变化情况	199
8.5.2 C/SiC 复合材料残余应力的拉曼光谱研究	200
8.5.3 PIP 周期对 C/SiC 复合材料纵向热膨胀性能的影响	201
8.5.4 PIP 周期对 C/SiC 复合材料横向热膨胀性能的影响	202
8.6 PIP-C 对 C/SiC 复合材料热膨胀性能的调控	203
8.6.1 陶瓷基复合材料的改性相	203
8.6.2 复合材料改性相对热膨胀性能的影响	204
8.6.3 PIP-C 周期数对 C/C-SiC 结构及力学性能的影响	204
8.6.4 PIP-C 周期数对 C/C-SiC 复合材料热膨胀性能的影响	208
第 9 章 环境试验对 C/SiC 复合材料热膨胀性能的影响	213
9.1 振动对 C/SiC 复合材料热膨胀性能的影响	213

9.1.1	试验方案	213
9.1.2	振动条件对 C/SiC 复合材料热膨胀性能的影响	215
9.2	湿热环境对 C/SiC 复合材料热膨胀性能的影响	216
9.2.1	试验方案	216
9.2.2	湿热条件对 C/SiC 复合材料热膨胀性能的影响	216
9.3	冷热循环条件对 C/SiC 复合材料热膨胀性能的影响	217
9.3.1	试验方案	217
9.3.2	冷热循环对 C/SiC 复合材料热膨胀性能的影响	217
第 10 章	近零膨胀 GSI C/C - SiC 复合材料的制备及性能研究	220
10.1	不同碳基体对 GSI C/C - SiC 复合材料的制备和性能的影响	220
10.1.1	不同碳基体素坯的基本情况	220
10.1.2	不同碳基体对 C/C - SiC 复合材料的组成和力学性能的影响	223
10.1.3	不同碳基体对 C/C - SiC 复合材料的热膨胀性能的影响	224
10.2	C/C PIP 周期数对 GSI C/C - SiC 复合材料的制备和性能影响	225
10.2.1	C/C PIP 周期数对 C/C - SiC 复合材料密度和组成的影响	225
10.2.2	C/C PIP 周期数对 C/C - SiC 复合材料力学性能的影响	227
10.2.3	C/C PIP 周期数对 C/C - SiC 复合材料热膨胀性能的影响	229
10.3	CVI C 界面改性层对 GSI C/C - SiC 复合材料的性能影响	230
10.3.1	CVI C 界面改性涂层的制备与表征	230
10.3.2	CVI C 层厚度对 C/C - SiC 复合材料的密度和组成的影响	231
10.3.3	CVI C 层厚度对 C/C - SiC 复合材料力学性能的影响	233

10.3.4	CVI C 层厚度对 C/C - SiC 复合材料热膨胀性能的影响	234
10.4	CVI C 界面改性层的调控机制研究	235
10.4.1	CVI C 界面改性层对力学性能的调控	235
10.4.2	CVI C 界面改性层对热膨胀性能的调控	236
10.5	纤维体积分数对 GSI C/C - SiC 复合材料性能的影响	238
10.5.1	纤维体积分数对 C/C - SiC 复合材料密度及力学性能的影响	238
10.5.2	纤维体积分数对 C/C - SiC 复合材料热膨胀性能的影响	239
第 11 章	轻质高稳定 C/SiC 复合材料支撑结构的制备技术	241
11.1	C/SiC 复合材料前镜筒制备	241
11.1.1	前镜筒结构设计	242
11.1.2	C 纤维预制件整体编织技术	244
11.1.3	PIP SiC 致密化技术	245
11.2	C/SiC 复合材料前镜筒测试与考核	245
11.2.1	尺寸稳定性测试	245
11.2.2	线膨胀系数测试	246
11.3	C/SiC 复合材料支撑结构研究展望	248
参考文献		249

第 1 章 绪 论

纤维增强 SiC 陶瓷基复合材料具有轻质、耐高温、高稳定性等优异性能,在航空航天诸多领域有着广泛的应用需求^[1-11]。空间相机是卫星有效载荷的重要组成部分,降低空间相机的质量可大幅度减少卫星的有效载荷,从而节约卫星的发射成本。空间相机的质量主要是由反射镜和光学支撑结构件组成,因此,空间相机光机结构的轻量化措施包括两方面:一方面是采用新型轻质的反射镜坯体;另一方面是采用轻质、高性能的支撑结构材料。其中,支撑结构件主要包括镜筒与主承力结构件等。

2000 年以来,基于新型高分辨率空间相机对轻质、高稳定性空间光机结构材料的需求,研究人员开展了纤维增强 SiC 陶瓷基复合材料在空间相机光学反射镜及其支撑结构上的应用研究,目前,以 C/SiC 为代表的陶瓷基复合材料已陆续在空间相机上获得应用,成为一类新型的空间光机结构材料。其发展过程简要叙述如下。

对于光学反射镜材料来说,目前已发展了三代:第一代为玻璃材料,包括石英玻璃、微晶玻璃、超低膨胀熔石英等;第二代为金属材料,主要以金属 Be 为代表;第三代为 SiC 陶瓷及其复合材料。

玻璃材料具有较低的热膨胀系数和较好的光学表面加工性能,已在光学反射镜上得到大量应用。但是,玻璃材料的缺点是:弹性模量和导热系数低,在温度交变环境下容易产生热应力变形,导致反射镜面形稳定性差,影响成像质量,满足不了新型高分辨率空间相机的要求;其次,玻璃材料是脆性的,在用于制备大型反射镜时,其轻量化过程非常困难,导致光学系统的重量居高不下,增加了卫星的制造与发射成本。

以 Be 为代表的金属反射镜虽然比刚度和导热系数很高,但是其热膨胀系数很高,易产生热变形,影响空间相机的成像质量;再者,金属 Be 有剧毒,对人体有害,在对其进行加工时需要采取一系列防护措施,这大大增加了制造成本,目前,基于环保考虑,欧美一些发达国家已经停止使用 Be 反射镜。

SiC 陶瓷材料具有弹性模量高、导热系数高、热膨胀系数低、热稳定性好等

优点,因此,适合用于反射镜体系。目前,国外 SiC 材料反射镜体系主要有:① 反应烧结 SiC 坯体+CVD SiC 涂层;② 普通烧结 SiC 坯体+CVD SiC 涂层。SiC 陶瓷反射镜的不足是:在坯体烧结过程中线收缩率大(反应烧结 SiC 坯体收缩率 $>2\%$;普通烧结 SiC 坯体收缩率 $>10\%$),坯体易开裂、可靠性不高,难以实现超大口径($>1.5\text{ m}$)单块整体主镜的制备。

C/SiC 复合材料反射镜体系为:C/SiC 坯体+SiC 光学涂层,具有密度低、结构轻量化、热稳定性好、光学加工性能优异等优点,是国际公认的新一代反射镜材料。其优势为:采用多孔 C/C 预制件渗 Si 烧结制备 C/SiC,坯体线收缩率小于 0.1% ,克服了采用其他 SiC 陶瓷镜坯制备方法收缩大、坯体易开裂的缺点;采用纤维增强改善了 SiC 本体陶瓷的脆性,提高了镜坯的可靠性。

轻量化空间相机支撑结构材料要具有以下特点:① 具有低密度;② 具有高的比刚度、比模量和抗蠕变性能;③ 具有低膨胀系数、高热导率;④ 在空间环境(真空、原子氧、冷热循环、辐射)下具有好的稳定性;⑤ 具有良好的加工性,满足支撑结构的轻量化要求。

目前,空间相机支撑结构可选用的材料有铸 Ti 合金、铸 Al 合金、铸 Mg 合金、因瓦(Invar)合金、C 纤维/树脂、SiCp/Al、C/SiC 复合材料等。对比发现,金属材料存在密度大、膨胀系数高的缺点(尽管 Invar 合金膨胀系数低,但其成型困难,难以制备大型结构复杂的光机结构件)。C 纤维/树脂比模量高、成型容易、具有可设计性,是一种理想的光机结构材料,但也存在以下问题:① 树脂材料耐辐照性能差,长期在空间环境暴露会变性,性能下降;② 树脂材料在空气中容易吸水,在空间真空环境中,水的释放会引起复合材料的尺寸变化;③ C 纤维/树脂复合材料蠕变性能差,应力状态(例如自重)下会发生尺寸的变化。因此对于精密的空间光学系统,C 纤维/树脂难以满足光机结构件高稳定性的应用要求。

近年来,随着 C/SiC 复合材料设计、成型方法、精密加工等技术的突破,其在空间相机支撑结构件(镜筒、整体框架、支撑杆、基座等)方面也表现出很大的应用潜能,具体表现为:① 低密度,且密度在 $1.7\sim 2.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 范围内可设计;② 高弹性模量,大于 130 GPa ;③ 低热膨胀系数,其膨胀系数可以采用调整复合材料的组分比和制备工艺来进行设计和调节;④ 应用温度范围宽,从 -270°C 到 $1\,200^{\circ}\text{C}$ 温度下的性能保持率良好;⑤ 耐空间环境辐射、耐化学腐蚀、耐磨损等。因此,C/SiC 复合材料正逐步发展成为新型高分辨率空间相机领域主流的轻量化支撑结构材料。