

# SiC光学反射镜发展现状

韩杰才 姚 旺 张宇民

(哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150001)

**文 摘** 主要综述 SiC 作为光学反射镜材料在设计、制造、光学加工和应用方面的发展现状, 同时对今后 SiC 作为光学镜片材料的发展趋势进行了展望。

**关键词** SiC, 反射镜, 设计, 制造, 光学加工

## Development in SiC Optical Mirror

Han Jiecai Yao Wang Zhang Yun in

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** The developments of silicon carbide optical mirror are summarized in this paper, focusing on the status of mirror design, fabrication, optical machining and applications. The trend of development of SiC as optical material is overviewed.

**Key words** SiC, Mirror, Design, Fabrication, Optical machining

### 1 引言

人们对太空的探索促进了对辅助观测系统的开发与研究, 在辅助观测系统中镜片的性能及稳定性直接影响着系统的使用。太空中高真空、失重和高能辐射等恶劣环境, 使得人们对镜片材料性能提出了很高的要求, 除了需要适用于特定波段、稳定性好、准确度及强度高外, 还需要具有质轻、低造价及大尺寸的优点<sup>[1]</sup>。

用 SiC 材料制作反射镜的研究始于 20 世纪 70 年代, 由于 SiC 材料具有低变形、高强、高反射等优良性能, 使其成为制造反射镜的理想材料。例如由 ISAS (Institute of Space and Astronautical Science) 开发的 2004 年发射的红外天文卫星 ASTRO - F, 就装有直径为 710 mm 的 SiC 主镜<sup>[2]</sup>。

随着 SiC 镜片的使用, 对它的研究也越来越深入。本文从 SiC 镜片的设计、制造、光学加工和应用

等方面介绍了近年来 SiC 光学镜片的发展现状。

### 2 SiC 反射镜的设计和制造现状

尽管 SiC 具有优异的力学和热学性能, 但在高性能光学设备中的使用却非常有限, 主要原因是缺少可靠且费用低廉的制造技术和优化设计的能力。

#### 2.1 SiC 反射镜的设计现状

SiC 反射镜的设计包括几何尺寸、力学结构、支撑方式和减轻结构质量等。

大口径反射镜可以提高仪器的分辨率, 而口径的加大会增大镜面自重, 同时增加发射费用, 因此目前镜片设计的关键是在保证具有足够刚度和高精度成像质量的前提下, 进行轻质化的结构设计。例如 POCO 制造的扫描镜片的结构质量大约为同样尺寸 SiC 实心体的 24%。最初的轻质化方法是通过在反射镜背部或侧面开孔以减轻结构质量, 后来开发出

收稿日期: 2004 - 06 - 18; 修回日期: 2004 - 09 - 16

作者简介: 韩杰才, 1966 年出生, 教授, 主要从事航天材料的制备和应用方面的研究工作

搭接融合技术并采用轻质材料制造反射镜等方法,有效地实现了光学元件的轻质化。在镜片基体上制作轻质化孔结构的形式主要有四种:背部开放型、背部封闭型、双开放的封闭型和组合型<sup>[3]</sup>。其中,以组合型的夹层结构最理想。意大利航天局用 SiC 材料制造了一个直径 310 mm 小卡塞格伦望远镜,总的结构质量仅为 4.3 kg,其主镜由一个反应烧结 SiC 泡沫核芯作基底,上下表面烧结 SiC 制得夹层结构,再沉积 CVD SiC<sup>[4]</sup>提供可抛光表面,其结构质量仅为 1.1 kg。

轻质化结构不仅要满足镜片自重变形以及机械冲击等环境因素的要求,还要具有良好的热学性能,因此在追求镜片轻质化的同时,还要兼顾镜片的刚度和热学性能要求。Yu v. Danchnko 等<sup>[5-6]</sup>采用聚氨酯泡沫作为核芯,制得了具有高抗变形能力的轻质化的夹层结构反射镜。随着各种分析软件的开发,为了节省时间和成本,通常对受力、受热和支撑结构在各载荷作用下对镜片面形、应力变化的影响进行模拟分析和计算,以检测镜片及其支撑分布是否满足刚度和热学性能要求。哈尔滨工业大学的张宇民等通过有限元法模拟计算了重力、温度场和光源辐照对多种材料镜片面形的影响,认为 SiC 镜片的刚度最高,热稳定性最好。

大口径镜片制造难度较大,可以利用钎焊技术将对称的镜片瓣连接到一起,不但简化设计,而且制造方便并能兼顾减重。例如 ASTRLM 为 Herschel 任务设计卡塞格伦式赫歇耳望远镜系统<sup>[7]</sup>,其主镜由 12 个外径为 3.5 m、内径约为 120 mm 的烧结 SiC 扇形体焊接而成,结构质量仅为 210 kg,其扇形体为开放式三角形加强筋轻质化设计,加强筋高度从扇形体中心的 110 mm 减小到边缘的 10 mm,大大减轻了结构质量,镜片如图 1 所示。

前面提及的均为被动镜片,当口径过大时,必须加厚镜片满足刚度要求,增加了结构质量。目前发展的自适应主动调节镜片设计方案,可在有效减重的同时制造超大口径镜片。自适应镜片方案是将大型镜片薄板通过制动调节器与支撑结构相连接,通过制动器对薄板进行精确调节,进而控制镜片的精确度。例如 Xinetics<sup>[8]</sup>公司制成的弯月面形 CERAFORM SiC 面板,含有整体刚性结构,能够解决薄、脆镜片的尺寸稳定性问题。这种自适应镜片通过控制调节器跨度、面板厚度、核芯筋和调节器的相对刚

度以及调节力的大小来控制调节器影响区域的面形。植入调节器的整镜如图 2 所示。大型薄板可用容易制造的小薄板进行组合,简化了设计和制造。

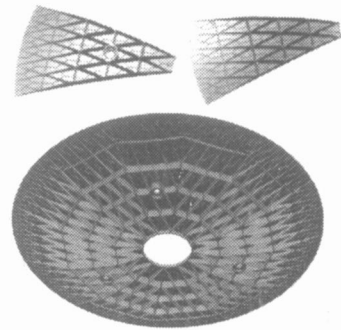


图 1 赫歇耳望远镜主镜的扇形段和整体  
Fig 1 HERSCHEL primary reflector and segments

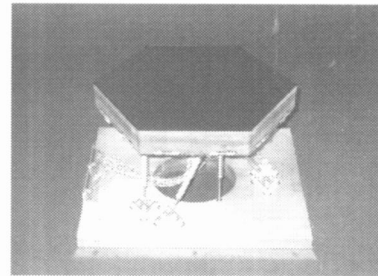


图 2 植入调节器的主动镜片  
Fig 2 Primary mirror with embedded actuators

对于 SiC 反射镜材料,国内学者也开始了部分研究,目前在设计方面的研究主要是对各种轻质化形式进行对比和选择。例如宋友贵等<sup>[9]</sup>分析了圆形平面镜体背部开口式和背部平板封闭式两种轻量化结构的参数,认为在自重变形量相同的情况下,采用背部封闭式轻量化结构可以将镜片做得更轻,但在选择了某种轻量化设计方案后,目前还没有提出行之有效的方法来具体确定反射镜体结构众多的几何参数。

## 2.2 SiC 反射镜的制造现状

SiC 镜片的制造方法主要有反应烧结法 (RB)、热压烧结法 (HP) 和化学气相沉积法 (CVD)。不同的制造方法,产品的显微粒度、气孔率和化学组成等明显不同,因此不同方法制成镜片的质量和光学性能也不同。

制造技术的研究是对现有制造技术的分析和完

善,以及对新型制造技术的探索。M. A. Pickering<sup>[10]</sup>等人对不同 CVD 反应器制得的 SiC 材料进行的化学、物理、光、热及力学性能检测表明,应用不同 CVD 反应器均可以制造出性能相近,具有理论密度、高纯、单向、均质的 SiC 反射镜。M. A. Ealey<sup>[11]</sup>等人开发的 CERA FORM 技术,降低了普通反应烧结中杂质对材料的污染和残留 C 造成的孔洞。可制成粗糙度小于 1 nm (rms) 的轻质化 SiC 反射镜,目前此技术具有一定优势。

作为制造 X 射线镜筒的备选材料,应该充分利用 SiC 材料的优良性能及低廉的价格等优点,制造出高性能的 X 射线镜筒。目前只制造了两个 SiC 的筒体,并且其制造技术还有待进一步完善。这两个筒体是 OAB (Osservatorio Astronomico di B rera) 采用新型复制技术,为 WAXS (Wide Angle X-Ray Survey) 的核心部件 WFXT (Wide Field X-ray Telescope) 制造的,为 X 射线镜筒的最外层筒体<sup>[12]</sup>: SiC - 1 和 SiC - 2,其制造过程如图 3 所示。

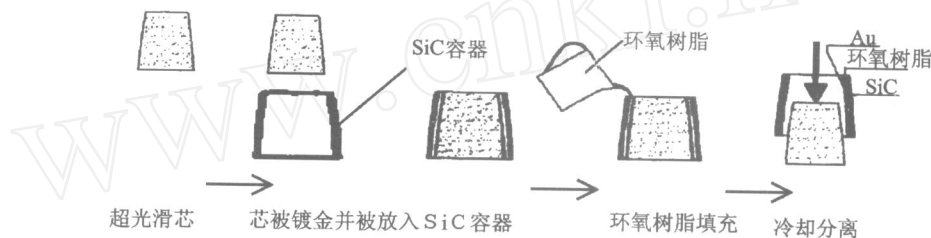


图 3 SiC 筒体复制过程

Fig 3 Replication process of SiC shell

参考了 SiC - 1 的制造经验, SiC - 2 筒体在 100 eV 下角分辨率 HEW (Half Energy Width) 约为 10 arcsec (角秒, arcsec = 1/3 600 °), 最小分辨率满足 WFXT 任务规范 (< 20 arcsec), 也满足 Con - X/SXT 望远镜的成像要求 (< 15 arcsec), 但由于成像变形, 所以该技术有待改进。

采用 SiC 复合材料也是制造轻质镜片的途径之一。ABG ECM 和 Astrium GmbH 公司经过 10 年对碳纤维增强 SiC 复合材料的研究, 完善制造技术, 制成了现在的 Cescic SiC 镜片材料。其制造方法是使用随机取向碳纤维标准多孔 C/C 刚性毡, 通过干馏、渗硅等步骤得到含 C、Si 和 SiC 的化合物陶瓷材料<sup>[13]</sup>。其制造的 C<sub>f</sub>/SiC 反射镜直径 630 mm, 结构质量仅为 4 kg, 目前可制作最大直径为 3 m 的大型反射镜, 可望用作美国下一代空间望远镜 (NGST) 中的反射镜<sup>[14]</sup>。

SiC 镜片的制造方法仍有待改善和开发以适应商业和空间光学需要。由于技术垄断, 先进的制造方法目前尚无法普及。POCO<sup>[15]</sup> 公司制造出了具有相同晶粒和孔隙尺寸的石墨基体, 并通过一定的化学转换方法使石墨在制成 SiC 成品过程中完全反应。其制造的 Super - SiC 的密度为 2.55 g/cm<sup>3</sup>, 孔隙率为 20%, 弯曲强度为 147 MPa, 弹性模量为 218 GPa, 韧性为 2.3 MN · m<sup>-2/3</sup>, 硬度为 19.5 GPa (knoop, 500 g 载荷), 热导率为 170 W/(m · K), 线膨胀系数为 2.0 × 10<sup>-6</sup>/K。目前已经能够获得无孔隙的 SiC 材料, 并且力学和热学性能都得到改善。

如上所述, 为降低 SiC 镜片的结构质量, 寻找能制造出高性能、低造价镜片的方法, 对面形的有限元计算和分析, 大型镜片减重的实现以及低造价易加工制造方法的开发都是镜片设计和制造技术的主要发展方向。

3 SiC 反射镜光学加工现状

低粗糙度表面可以保证接收信号的准确性和仪器的精确性, 如何获得超光滑表面也是反射镜研究的热点。各国研究人员在 SiC 材料光学加工方面已经进行了深入探索, 主要是在降低制造成本, 寻找高效、省时且经济的加工方法方面。

### 3.1 SiC 反射镜加工方法的研究现状

由于 SiC 的高硬度和脆性, 无法用传统光学加工方法获得高质量光学表面, 多用金刚石单点车削或用固定磨粒研磨对 SiC 进行光学加工。例如 T. G. Bifano 用固定磨粒研磨方法磨削 CVD SiC, 在实验室范围和商业范围均获得了粗糙度为 0.55 nm (rms) 的光学表面。ASTRUM 设计的直径为 3.5 m 的卡塞格伦式望远镜系统<sup>[7]</sup>, 其次级反射镜为烧结

SiC,光学表面厚 2.4 mm,磨削后表面粗糙度  $<0.5 \mu\text{m}$  (rms)。R A Paquin<sup>[16]</sup>等制造了具有较低面密度 ( $10 \text{ kg/m}^2$ )、直径为 610 mm 的 SiC 镜片,用金刚石砂轮研磨获得了 1 nm (rms)的低粗糙度镜面。

SiC的低断裂韧度使它对裂纹非常敏感。目前对 SiC 镜片的光学加工主要研究了砂轮参数、晶粒尺寸、晶粒密度和研磨参数、切削和进给深度对表面粗糙度、表面完整性和下表面损伤的影响,希望通过工艺参数的优化,获得高光滑低损伤表面。例如研究 EL D 研磨方法对 CVD SiC 进行磨削实验中,分析得出 EL D 方法较传统研磨方法的材料去除率高<sup>[17]</sup>,其韧性模式占去除模式的比例较大,具有获得极光滑表面的潜力。SSGPO (SSG Precision Optonics Inc)<sup>[18]</sup>改善了 SiC 镜片制造技术,可通过传统方法获得高质量抛光表面,其抛光制得的平面和球面 SiC 反射镜的面形精度可达 0.016 (rms),粗糙度为 0.8~1.5 nm (rms),如图 4 所示。

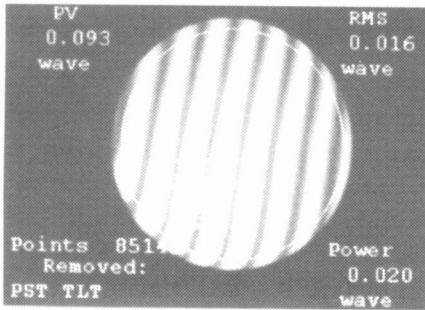


图 4 典型的 RB SiC 光学表面  
Fig 4 Typical RB SiC surface

此外,新的加工和修整方法也被开发出来,如磁流变磨光 (MRF)和离子束修琢 (BF)等。Masataka Murahara<sup>[19]</sup>用光化学方法在短时间内得到了高精度抛光 SiC 镜片。用 KrF 激光对 3C - SiC 抛光 60 min,获得了 80 nm 的粗糙度。离子束修琢被认为是传统加工步骤之后的最终修正,它提供了相当好的数控式材料去除过程,但是缺点是增加了表面粗糙度。意大利航天局建成的 Ar 离子射线修琢设备可对直径达 500 mm 的 SiC 进行抛光<sup>[20]</sup>。Zogo 公司用制成的磁流变抛光机,对 CVD SiC 进行加工,认为虽然磁流变抛光的速度较慢,但是可以通过编程针对局部进行精确的修整,从而提高了加工效率<sup>[21]</sup>。

由于机械加工和热加工会在 SiC 表面下层造成

一定破坏,影响成像稳定性,所以研究者在深入研究磨削破坏的表面层的同时,希望通过韧性磨削来获得低损伤、高光滑的表面。CVD SiC 的临界切削深度为 180 nm,更容易在完全塑性状态下进行实验室和生产研磨,但是国内对这种以韧性磨削形式获得 SiC 光学表面的研究才刚刚起步。

### 3.2 涂层加工研究现状

P. A. Jones<sup>[22]</sup>等人指出 SiC 普通烧结和热压烧结所生成的典型无定型材料难以抛光,而反应烧结的 SiC 复合材料的两相具有相差悬殊的硬度值,使抛光的均匀性受到影响,因而认为在 SiC 表面覆盖一定厚度的 Si 层或多晶 SiC 会降低加工难度。为获得低粗糙度、低损伤表面,通常对 SiC 镜体表面进行改性,其方式为在镜体表面涂覆易抛光膜。这层膜既要容易抛光,还要与基底的热学性能相同或相近。CVD SiC 是公认的与 SiC 材料热性能相近且可抛光到粗糙度在 1 nm 以下的 SiC 材料。SSGPO 对非球面 Si 涂层 SiC 镜片进行抛光后,得到 1.5~2.5 nm (rms)粗糙度的表面,如图 5 所示。

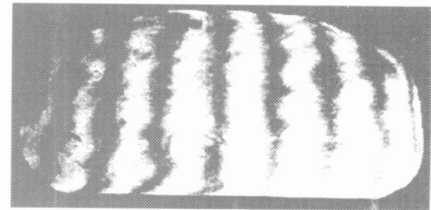


图 5 Si 涂层非球面 SiC 表面干涉图  
Fig 5 Interferogram of Si coated SiC aspheric surface

最近 ABG 开发了新型 SiC 浆料涂覆工艺,该工艺将含 SiC 的浆料涂覆在已研磨好的镜片表面,再使涂层转变为均匀致密的两相陶瓷层,可通过优化涂层中 Si 和 SiC 比率,使涂层 CTE 值与基体材料在较大温度范围匹配<sup>[23]</sup>,用标准技术进行抛光就获得了  $<2 \text{ nm}$  (rms)的粗糙度。M. B. Magida 等<sup>[24]</sup>介绍了一种由 HDOS 首先提出的正在发展中的沉积方法——BS (Ion Beam Sputtering technique) 技术,这项技术在低温低压过程中进行,并可得到较均匀涂层,沉积的 8 mm 厚的涂层与基体粘接良好。他们对 CVD SiC、BS SiC、PVD Si 及无涂层 RB SiC 在 120~300~120 循环温度下进行干涉对比实验,实验表明 BS SiC 涂层变形微小 ( $<0.07 \mu\text{m}$ )。

632.8 nm),是低温稳定的。

考虑热匹配问题,目前对镜片加工技术的研究仍然着重在直接、高速加工 SiC 镜片材料上。随着计算机数控加工技术的开发,磨削有向自动化智能化方向发展的趋势。

#### 4 SiC反射镜应用的研究现状

SiC作为新型光学材料,目前还无法完全了解其在各种环境下的性能表现。但是凭借其优良的性能,已经成为制造“21世纪计划”镜片的备选材料,因此对 SiC材料特性的深入了解和在应用方面的研究开发非常具有实际意义。

SiC材料的低热变形性和宽波段适应性使得研究者对 SiC反射镜在不同波段以及在冷、热和高能辐射等环境下工作的可行性进行了更加深入的研究。R. A. M. Keski-kuha<sup>[25]</sup>等人对 CVD SiC在超高紫外线照射下的性能进行了研究, SiC镜面虽然在紫外成像和分散度检测后产生了不期望的面形变化,但是在波长低于 60 nm 范围内仍具有较高的反射率。J. T. Kenneth 等对直径为 500 mm、结构质量为 6 kg 的反应烧结光学镜片在 10 K 下的热学性能进行了研究,表明镜片具有均匀热应变和较低滞后。Vavilov State Optical Institute 改进了其制造 Sicar(含有 SiC 和 Si 的反应烧结两相材料)的方法,使 Sicar 镜片可以在无变形的情况下使用于低温环境<sup>[26]</sup>,对曲率半径为 599 mm、直径为 169 mm、厚度为 19 mm 的球面 Sicar 镜,在 162 mm 通光孔下进行低温性能测试。在消除球差后,得到波前误差大约变化为  $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 。在考虑误差的情况下,认为在冷却到液氦温度(4 K)时镜片的表面形貌不会改变。

在 442 ~ 2 226 nm 波段内获得地球资源探测卫星式多谱图数据的 NASA's Earth Observing - 1 使用的是 ALI (Advanced Land Imager) 设备,此设备的望远镜使用了 SiC 反射镜片,可提供完整宽阔视域 ( $15^\circ \times 1.26^\circ$ ) 的图像,其设备如图 6 所示。对此设备的光学性能进行了测量,得到包括制造、排列和设计残余误差在内的望远镜系统水平波阵面  $< 0.09 \mu\text{m}$ 。在 NASA's Deep Space - 1 上的 MICAS (Miniature Infrared Camera and Spectrometer) 设备由 SiC 镜片和全 SiC 光具台组成,此设备如图 7 所示。在室温和工作温度(135 K)下的测试显示系统具有很好的热稳定性,误差在测量条件干扰值以内<sup>[22]</sup>。以上两个设备已经由 NASA 发射,它们的成功不但

提供了科研数据,还证实了 SiC 材料技术的可靠性。

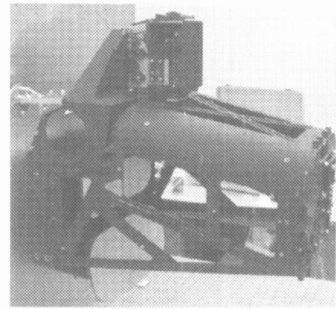


图 6 SiC 高级地面成像器

Fig 6 SiC advanced land imager

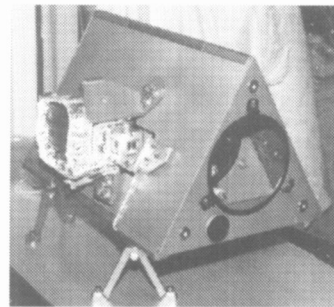


图 7 全 SiC MICAS 设备

Fig 7 All-SiC MICAS instrument

SiC 在 60 ~ 200 nm 波段具有比较高的正入射反射率(30% ~ 50%), G. E. Holland<sup>[27]</sup>等人模拟低地球轨道 5 年累积的辐射流量,用能量分别为 95 keV 电子和 100 keV 中子照射 SiC 镜片的实验中,证明了在 58.4 ~ 161 nm 内, SiC 镜片不受辐射的影响,是在 60 ~ 20 nm 波段具有高反射(反射 30% ~ 50%)和高性能的耐久性材料。MASATO OHMURA<sup>[28]</sup>利用 SiC 的高反射率和高抗破坏性,对在真空紫外区接收氩激发的 SiC 镜片研究认为, SiC 可在最大能量为 16 MW、氩原子激发激光产生的真空紫外区域进行光波的收集工作。日本红外天文卫星携带的 ASTRO - F 望远镜,是结构质量为 42 kg 的 Ritchey - Chretien 系统,其主镜有效直径为 670 mm,结构质量为 11 kg,面密度为 28 kg/m<sup>2</sup>。主镜和副镜由夹层状的 SiC 材料制造,它包含轻质的多孔 SiC 核心和致密的 CVD SiC 涂层。整个系统将在轨道上被高流动性液氦和机械冷却器冷却到 5.8 K。经过对主镜和整个望远镜集集体分别进行测试后,认

为在 10 K 时主镜的变形主要是由支撑结构的收缩造成, 而由 SiC 镜片自身变形引起的误差非常小<sup>[29]</sup>。其对望远镜研究的全部结果显示, 夹层形式的 SiC 材料应用于大尺寸冷却镜片上具有广阔前景。

## 5 结语

SiC 材料作为制备优异光学反射镜的理想材料, 今后的研究应该集中在以下几方面。

(1) 解决大口径 SiC 镜片轻质化结构的设计问题, 并对可抛光镜片的制造方法以及自适应主动镜片进行深入研究。其制造技术应该由实验室阶段向生产阶段转化。尤其是国内应深入研究反射镜制造工艺、设备以及如何降低制造成本。

(2) 对 SiC 镜片的特种加工技术的开发, 以及智能化、自动化数控加工平台的开发和完善。

(3) 掌握镜片在应用环境下的性能, 以扩大其使用范围。

## 参考文献

- 1 郝寅雷等. 新型反射镜材料——碳化硅. 宇航材料工艺, 2001; 31(4): 11~14
- 2 Ebizuka N et al Development of SiC ultra light mirror for large space telescope and for extremely huge ground based telescope SPIE, 2003; (4 842): 329~335
- 3 吴清文. 空间相机中主镜的轻量化技术及其应用. 光学精密工程, 1997; 5(6): 69~81
- 4 Novi A et al Lightweight SiC foamed mirrors for space applications SPIE, 2001; (4 444): 59~66
- 5 Danchenko Y et al Attempt to fabricate light-weight mirrors from a composite ceramic material J. Opt Tech, 1998; 65(2): 169~171
- 6 Fortini A. Open-cell silicon foam for ultralight mirrors SPIE, 1999; (3 786): 440~446
- 7 Emmanuel Sein et al A 3.5 m SiC telescope for HERSCHEL mission SPIE, 2003; (4 850): 606~619
- 8 Ealey M A. Fully active telescope. SPIE, 2004(5 166): 19~27
- 9 宋友贵等. 反射镜体轻量化结构设计的对比研究. 兵工学报, 2000; 21(2): 137~139
- 10 Pickering M A, Taybr R L, Keeley J. Chemically vapor deposited silicon carbide for optical application SPIE, 1989(1 118): 2~14
- 11 Ealey M A et al Polishability of CERAFORM silicon carbide SPIE, 1996; (2 857): 78~85
- 12 Citterio O, Conconi P, Ghigo M. Development of soft and hard X-ray optics for astronomy: progress report II and con-

siderations on material properties for large diameter segmented optics of future missions SPIE, 2002(4 496): 23~40

- 13 Wagner R. Advanced materials for ultra-lightweight stable structures SPIE, 1999; (3 737): 232~241
- 14 Krödel M, Kutter G S, Deyerler M. Short carbon-fiber reinforced ceramic-Cesic for optomechanical applications SPIE, 2003; (4 837): 576~588
- 15 Plummer R, Bray D. Guidelines for design of supersic silicon carbide mirror substrates and precision components SPIE, 2002; (4 771): 265~275
- 16 Paquin R A et al Large optic from silicon carbide SPIE, 1991; (1 618): 53~60
- 17 Ebizuka N et al Development of SiC ultra light mirror for large space telescope and for extremely huge ground based telescope SPIE, 2003; (4 842): 329~334
- 18 Robichaud J. SiC optics for EUV, UV and visible space missions SPIE, 2003; (4 854): 39~50
- 19 Murahara M. Excimer laser-induced photo-chemical polishing of SiC mirror SPIE, 2002; (4 679): 69~75
- 20 Novi A, Basile G, Citterio O. Lightweight SiC foamed mirrors for space applications SPIE, 2001; (4 444): 59~65
- 21 Johnson J S, Grobsky K, Bray D J. Rapid fabrication of lightweight silicon carbide mirrors SPIE, 2002; (4 771): 243~253
- 22 Jones P A et al Cryogenic performance of passive lightweight mirror SPIE, 1998; (3 356): 883~891
- 23 Deyerler M et al Ultra-lightweight mirrors: recent developments of C/SiC SPIE, 2000; (4 003): 73~80
- 24 Magida M B et al Dimensional stability of bare and coated reaction bonded silicon carbide SPIE, 1990; (1 335): 60~68
- 25 Keski-kuha R A M et al CVD silicon carbide mirrors for EUV applications SPIE, 1995; (2 543): 173~177
- 26 Robb P et al Interferometric measurements of silicon carbide mirrors at liquid helium temperature SPIE, 1995; (2 543): 196~200
- 27 Holland G E et al Effect of energetic electron and proton bombardment on the reflectance of silicon-carbide mirrors in the extreme-ultraviolet region Applied Optics, 1994; 33(25): 5900~5905
- 28 Ohmukai M et al Observations of SiC mirror damage induced by an argon excimer laser J. Appl phys, 1992; (31): 696~699
- 29 Kaneda H et al Optical performance of the ASTRO-F telescope at cryogenic temperatures SPIE, 2003; (4 850): 230~241

(编辑 吴坚)

宇航材料工艺 2005年 第4期