

文章编号 1674-2915(2009)02-0071-08

# SiC 空间反射镜材料及其表面改性技术现状分析

高劲松,申振峰,王笑夷,王彤彤,陈红,郑宣鸣

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033)

**摘要:** SiC 材料具有良好的物理特性和机械特性,是制备大口径空间反射镜的主要候选材料之一,而 SiC 反射镜的制备、加工及其表面改性技术是推动高水平空间光学系统应用的重要条件。本文从实际工程应用的角度出发,分析了几种常用 SiC 基底反射镜材料的特性,介绍了 4 种 SiC 的制备工艺。研究了目前国内外 SiC 基底反射镜的应用现状及其表面改性情况,对改性层的性能指标、制备工艺和发展趋势进行了深入讨论。针对目前国内反射镜材料应用现状,认为加快高性能 SiC 基底材料研发工作步伐,并找到一种利用现有大口径 PVD 设备低温制备优质 SiC 改性层的方法是今后工程应用的发展方向。

**关键词:** SiC; SiC 反射镜; 表面改性

**中图分类号:** O484.4; TN307; TN304.24 **文献标识码:** A

## Research status quo of SiC space mirror material and its surface modification

GAO Jin-song, SHEN Zhen-feng, WANG Xiao-yi, WANG Tong-tong, CHEN Hong, ZHENG Xuan-ming

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** SiC has favorable physical and mechanical properties and it has become an important material for the large aperture substrates of space mirrors due to its excellent synthetical performance. The technologies of fabrication, manufacturing and surface modification of SiC mirrors have acted a more and more important role in the application of space optical systems. Combined with the engineering application, the characteristics of the SiC material in common use for space mirrors are analyzed and four kinds of fabricating methods are introduced. The current status of the application and the surface modifications of SiC mirrors at home and abroad are researched and the guide lines and the technics for the surface modification coatings are discussed in detail. According to the internal current status of engineering application, it is considered that developing high performance SiC substrate materials in a high speed and using the large aperture PVD equipment to prepare high quality SiC coatings for the surface modifications are the development direction in the future.

**Key words:** SiC; SiC mirror; surface modification

收稿日期:2009-01-17;修订日期:2009-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60478035)

# 1 引言

随着空间观测和遥感技术的飞速发展,高质量空间光学系统在侦察、遥感、探灾、气象、天文观测等军事应用和民用领域中得到了广泛应用,同时人们对空间光学系统的性能要求也越来越高。由于空间应用的特殊性,空间光学系统多采用反射式光学系统<sup>[1,2]</sup>,反射镜的品质对其系统性能起着举足轻重的作用。为满足应用需求,空间反射镜向着大口径、长焦距、高光学性能的趋势发展<sup>[3,4]</sup>,从而进一步对反射镜的制备和加工工艺的技术瓶颈提出挑战,而要解决这一难题,必须通过改进反射镜应用技术来实现。在这种情形下,SiC 凭借其优异的物理和机械特性,在众多的备

选材料中脱颖而出,已经成为制备空间反射镜基底的主要候选材料之一,并且随着 SiC 应用技术的不断发展,其在大口径空间光学系统中的地位已经越来越不可替代<sup>[3,5~12]</sup>。因此,要在空间光学应用领域占有一席之地,就必须大力发展 SiC 反射镜空间应用技术。

## 2 SiC 材料的特性

### 2.1 SiC 与传统材料性能的比较

理想的空間反射鏡材料應具備優異的物理特性、機械特性和熱特性,以適於機械加工和空間環境變化,另外還要有較低的加工成本。表 1 所示為 SiC 材料特性與常用的其它反射鏡材料的性能比較<sup>[13]</sup>。

表 1 SiC 和传统反射镜材料的物理性质

Tab. 1 Properties of SiC and traditional mirror materials

样品	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	弹性模量 $E/GPa$	比刚度 $(E/\rho)/(kN \cdot m \cdot g^{-1})$	热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6} \cdot K^{-1})$	导热系数 $\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	热稳定系数 $(\lambda/\alpha)/(10^6 \cdot W \cdot m^{-1})$
RB-SiC	3.04	330	112	2.4	170	71.43
ULE	2.21	67	30.3	0.015	1.30	83.33
Zerodur	2.53	92	36.4	-0.09	1.6	17.86
Be	1.85	287	155	11.3	216	19.23
Al	2.70	68	25.2	22.5	167	7.69
期望值	低	高	高	低	高	高

从表 1 中的数据对比结果可以看出,SiC 材料具有较小的密度和较高的弹性模量,从而使其比刚度(Specific stiffness)较高。比刚度越高,该材料实现相同机械性能的轻量化能力越好<sup>[14]</sup>,可以最大程度地降低镜体的质量,降低发射成本。同时,SiC 材料还具有较低的热膨胀系数和较高的导热系数,使其热稳定系数(Thermal stability)较高。很显然,热稳定系数越高,材料的热稳定性就越好,抗热震性能就越佳,可以降低对热控系统的要求,减少热控系统的质量和功耗<sup>[7]</sup>。从图 1 所示材料的比刚度和热稳定系数比较中可以看到 SiC 的优势十分明显。另外,该材料还具有光学加工性能良好,可做到净近尺寸成型,抗辐照性能极佳,无毒、不需特殊设备等众多优点。SiC 材料凭借其在物理特性、机械性能、热性能等方面的综合优势,已经替代玻璃和金属成为第三代空间反射镜坯体材料的主要代表。

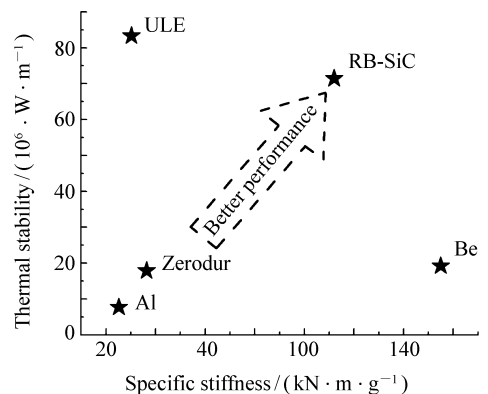


图 1 材料比刚度和热稳定系数比较

Fig. 1 Comparison of specific stiffness and thermal stability

## 2.2 几种常用 SiC 材料特性

SiC 材料的制备工艺方法很多,其中工程上常用的主要有4种:热压烧结 SiC(HP-SiC)、常压烧结 SiC(Sintered SiC;S-SiC),反应烧结 SiC(RB-SiC)和化学气相沉积 SiC(CVD-SiC),其制备工艺如下<sup>[15-17]</sup>:

### (1)热压烧结 SiC(HP-SiC)

热压烧结 SiC 就是把微米级的 SiC 粉和助烧剂及阻止晶粒过分长大的添加剂混合,在一定的温度、压力和时间下进行烧结成型。这种方法是制备高密度、性能优异的 SiC 材料最有效的途径之一。热压烧结 SiC 镜坯具有致密程度好、抗弯强度高、材质均匀和加工性能良好等优点。

### (2)常压烧结 SiC(Sintered SiC;S-SiC)

常压烧结又称无压烧结,是把高纯度的亚微米 SiC 粉和联结剂、助烧剂等均匀混合,在冷等净压下成型素坯,利用数控加工技术将素坯加工成所需要的形状,最终在 2 000 °C 左右的高温下烧结而成。这种方法是当今制备大尺寸轻型 SiC 反射镜坯最有效的手段。

### (3)反应烧结 SiC(RB-SiC)

反应烧结 SiC 的制备工艺是在陶瓷先驱体中反应活性的碳与熔融硅反应生成新的 SiC,新的 SiC 原位结合先驱体中原有的 SiC 颗粒,多余的硅填充气孔,在 1 500 ~ 1 600 °C 条件下最终形成 100% 致密的 SiC 坯体。反应烧结 SiC 通常含有 10% ~ 30% 的游离硅。

### (4)化学气相沉积 SiC(CVD-SiC)

化学气相沉积 SiC 是在 1 200 ~ 1 800 °C 的温度下,利用有机先驱体(通常为  $\text{CH}_3\text{SiCl}_3$ , MTS)在基体表面直接反应沉积生成 100% 致密的 SiC 膜层。CVD-SiC 各向同性,而且可以得到良好的光学表面。

在这4种材料中,HP-SiC 由于不能制成复杂形状的镜坯,因此限制了其在轻型反射镜方面的应用。传统的 S-SiC 制备工艺复杂,收缩率大,一般达到了 10% ~ 20%,并且所需设备十分昂贵,也制约了其制备技术的发展,但随着其制备工艺的不断改进和性能完善,S-SiC 作为反射镜基底材料也具有相当的应用前景。CVD-SiC 材料虽然致密均匀,性能较好,但其制备速度非常缓慢,不

能制备出复杂轻量化结构的坯体,因此一般不用作基底材料而是将 CVD-SiC 应用在 SiC 镜体的表面改性上。利用 RB-SiC 可以直接制备出复杂结构、轻量化程度较高的大尺寸镜坯而无需额外轻量化加工,而且收缩率小,仅为 1% ~ 2%,是一种近净尺寸(Near Net Shape, nns)成型工艺,并且加工成本较低。因此,RB-SiC 是目前制备大口径复杂轻量化结构反射镜坯体的优选材料。

## 3 SiC 基底反射镜应用情况

人们对 SiC 材料作为反射镜基底的研究始于 20 世纪 70 年代末,美国、德国、日本、法国等先进国家都把 SiC 反射镜列为国家技术发展的重点,在其制备工艺和加工技术方面进行了大量研究,积累了丰富的经验,并竞相把它应用到航空航天等领域,特别是近 10 年来, SiC 反射镜技术已在众多空间项目中得到了广泛的应用。

哈勃(Hubble)望远镜的继任者即美国新一代空间望远镜(NGST)——JWST 望远镜、第二代 Hopkins 紫外望远镜、0.5 m GEO 望远镜、MICAS、ALI、LORRI、HIRDLS 等空间项目以及美国弹道导弹防御系统(NMD, TMD)等诸多研究开发项目都应用了 SiC 反射镜技术<sup>[2,18]</sup>。以法国、德国为首的欧航局开发的一系列空间项目 OSIRIS、ROCSAT2、Herschel、SOFIA、ALADIN 中也大量应用了 SiC 反射镜。其中 Herschel 主镜直径达到 3.5 m,是目前空间望远镜之最<sup>[19-21]</sup>。日本 2006 年发射的 ASTRO-F 天文望远镜和拟于 2010 年发射的 SPICA 红外天文望远镜也都毫无例外地应用了 SiC 反射镜<sup>[22]</sup>。

在国内,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院上海硅酸盐研究所、哈尔滨工业大学以及国防科技大学等单位,都在进行着 SiC 反射镜应用技术的研制与开发工作。虽然相关研究工作开展的比较晚,但也已经在 SiC 反射镜应用技术领域取得了丰硕的研究成果,制备出了适宜工程应用的较大口径的 RB-SiC 和 S-SiC 基底<sup>[8,15,23]</sup>。目前,我国 SiC 反射镜空间应用正处于工程准备阶段,随着我国航天事业的蓬勃发展,不久的将来必将有我国自主制造的 SiC 反射镜空

间光学系统在航天项目中得到成功应用。

## 4 SiC 基底表面改性

### 4.1 表面改性的必要性

目前工程上常用的 SiC 反射镜基底材料主要是 RB-SiC 和 S-SiC 两种。由于制备工艺的原因, RB-SiC 材料中包含了 SiC 和 Si 两相成份,而 SiC 和 Si 两相物理特性的差异导致在抛光过程中两相成份的去除速率不相同,这很容易在两相成份的交界处形成台阶<sup>[24]</sup>。而对于 S-SiC 材料,虽然其成份单一,但也不是 100% 致密,在其材料内部存在大量的孔洞,形成一定的气孔率。图 2 所示为直接抛光后的两种基底表面 500 倍光学显微镜照片,图 2(a) 中所示深色部分为 SiC 材料,浅色部分为反应过程中渗入到 SiC 材料中的单质 Si,可以很明显地看到, RB-SiC 材料在两相成份交界

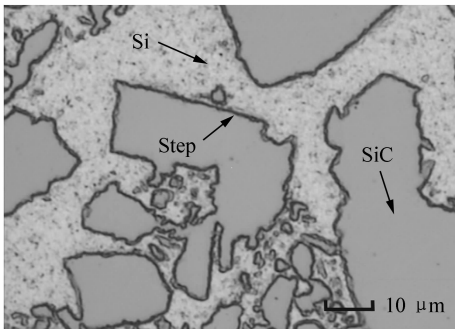
处产生了明显的台阶效应,在 Si 相成份处形成了凹陷,这使基底表面凹凸不平,必然会降低表面的光学质量。图 2(b) 中所示浅色部分为 SiC,深色部分为孔洞。正是由于一定气孔率的客观存在,使 S-SiC 材料也无法直接获得高质量的光学表面<sup>[19]</sup>。直接抛光后的两种 SiC 基底表面光学质量并不高,表面粗糙度(RMS)在 2.0 nm 左右,仍然较大,还无法满足高质量空间光学系统的应用要求。

根据总积分散射理论<sup>[25]</sup>,粗糙表面的总积分散射(TIS)与其表面粗糙度  $\delta$  密切相关,随着  $\delta$  的增加,TIS 急剧上升,变化十分灵敏。相关测试结果表明,直接抛光后的 SiC 表面光散射损耗仍较大, RB-SiC 表面散射系数达到 10%, S-SiC 表面散射系数也有 4% 左右(散射系数定义为散射光与镜面反射光和散射光总和的比值)<sup>[26]</sup>,这必然会产生系统杂散光,导致基底镜面反射率的降低,影响整个光学系统成像质量。这种情况在高质量空间光学系统中是不允许的。因此,为满足空间应用要求,必须对基底表面进行改性,设法降低 SiC 基底表面的粗糙度,从而降低基底表面的光散射损耗,以获得较高的光学反射率。

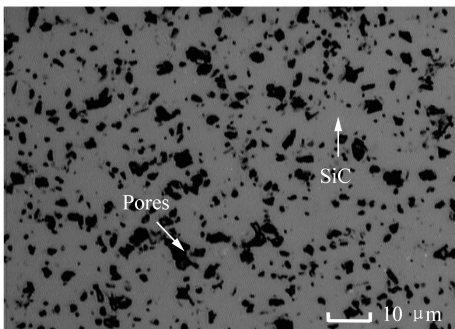
### 4.2 对改性层的要求

所谓 SiC 基底表面改性就是要在 SiC 基底表面镀制一层与基底结合牢固、且抛光性能良好的具有相当厚度的致密膜层,覆盖住基底表面缺陷,然后再对致密改性层进行光学精密抛光,以达到获得较高质量的光学表面的目的。这种改性膜层与以往应用的光学薄膜在功能上有本质的不同,其性能要求也不同,一种理想的改性膜层应具备以下性能要求:

- 1) 与基底结合牢固;
- 2) 制备温度低,工艺方法简单、可靠;
- 3) 膜层致密均匀,硬度适中,抛光性能良好;
- 4) 具有适当的厚度,能够覆盖住表面缺陷同时满足光学加工要求;
- 5) 热变形系数小,抗热震性能好;
- 6) 热性能和机械性能与基底匹配良好;
- 7) 有较好的耐空间环境(辐射,原子氧等)能力。



(a) RB-SiC 基底表面  
(a) RB-SiC substrate



(b) S-SiC 基底表面  
(b) S-SiC substrate

图 2 两种基底表面 500 倍显微镜照片

Fig. 2 500 × photomicrograph of two kinds of substrates

## 5 SiC 基底表面改性方法研究

### 5.1 改性方法现状

目前,国际上较为流行的 SiC 基底表面改性方法主要有两种,一是在基底表面上用化学气相沉积方法制备 SiC 改性层(CVD SiC)进行改性,二是用物理气相沉积方法制备 Si 改性层(PVD Si)进行改性<sup>[27]</sup>。美国、法国、德国、日本等航天大国在研发 SiC 基底加工工艺的同时也都在积极开展 SiC 基底反射镜表面改性工作,并已在多项航天型号产品中得到成功应用。

以美国为例,Trex Advanced Materials 公司制备的 CVD SiC 改性层抛光后表面粗糙度优于 0.2 nm RMS<sup>[27,28]</sup>。POCO 公司在 1 m 口径 RB-SiC 反射镜光学面上用 CVD 法生长 2 mm 厚的 SiC,然后对这层 SiC 膜抛光,使表面粗糙度值达到 1 nm RMS<sup>[29]</sup>。另外,Esatman Kodak 公司在抛光后的 0.5 m 口径 RB-SiC 反射镜光学面上镀 0.5 mm 的 Si 膜,然后再对 Si 膜进行抛光,使表面粗糙度值下降到 2.5 nm RMS<sup>[30]</sup>。SSG 公司制备的 PVD Si 改性层抛光后表面粗糙度优于 0.4 nm RMS,并且通过了低温热稳定性测试,应用在 NASA 的 Geo-stationary Earth Observatory (GEO)计划的反射镜上<sup>[31]</sup>。HDOS 公司分别对制备在 RB-SiC 基底上的 CVD SiC 改性层和 PVD Si 改性层的低温特性进行了测试,结果表明,经过两个温度循环(300 ~ 120 K),CVD SiC 面形变化较为明显,而 PVD Si 则具有相对较好的稳定性<sup>[32]</sup>。此外,法国 BOOSTEC 公司已经在 S-SiC 基底上用 CVD SiC 表面改性方法加工出 < 0.1 nm 的粗糙度,这也是目前所报道过最光滑的 SiC 表面,其相关技术已在欧航局 ROCSAT2 望远镜等多个项目中得到应用<sup>[19,33]</sup>。德国的 ECM 公司和日本的 MELCO 公司在联合研发的 800 mm 口径 HB-Cesic 基底上,应用 Si 改性层的工艺方法进行了表面改性,抛光后粗糙度达到 0.6 nm RMS<sup>[34]</sup>。

在国内,对于 SiC 表面改性的研究起步较晚。国防科技大学和哈尔滨工业大学重点研究了用

CVD SiC 改性层进行表面改性的方法,并分别对 220 mm × 150 mm 椭圆反射镜和 250 mm 圆形反射镜表面进行了改性试验,抛光后基底表面粗糙度分别达到了 0.372 nm RMS 和 1.478 nm RMS<sup>[8,35,36]</sup>。长春光学精密机械与物理研究所已经成功地运用 PVD Si 方法对一系列大口径 SiC 基底表面进行了改性,加工后表面粗糙度达到了 < 0.6 nm RMS 的水平,同时也在努力探索适于工程应用的 PVD 方法低温制备 SiC 改性层的工艺方案。

### 5.2 改性方法分析

用 CVD 改性层进行 SiC 基底表面改性效果极佳,但由于其制备改性层过程中沉积温度较高,一般 > 1 000 °C,很容易产生应力,造成基底面形改变,这是工程应用所不允许的。CVD SiC 的  $\beta$  相与基底  $\alpha$  相不匹配,这也影响了基底面形的热稳定性<sup>[32]</sup>。由于改性层 SiC 硬度高,加工费用相当昂贵,尾气中通常有 HCl 气体,需要进行尾气处理。对于 PVD Si 改性层,制备温度相对较低,并可控制在工程应用的要求范围之内。由于 Si 的硬度相对较低,改性层要更容易抛光,达到相同抛光精度所需时间更短。另外,PVD Si 改性层为单质,不存在异质材料抛光速率不同所引起的抛光精度差的问题,同时该工艺对加工设备要求不高,工艺方法较为成熟且可靠性较高。从加工设备角度考虑,目前国内尚缺乏适宜制备大口径基底的 CVD 设备,而用于制备大口径基底光学薄膜的 PVD 设备则比较成熟可靠,因此,利用 PVD Si 改性层进行 SiC 基底表面改性是当前国内工程实践应用的最好选择方案。

### 5.3 发展趋势

空间高质量光学系统对反射镜基底的光学性能要求很高,SiC 材料要想实现空间应用就必须保证其表面具有较高的光学质量。实现这一目标的途径有两个:一是改进制备工艺,设法提高基底材料的均匀性和致密度,制备出可以通过直接抛光获得高质量光学表面的 SiC 基底材料。国外有许多公司都在进行这方面的研究,其中美国 Trex Advanced Materials 公司利用改进的 CVD SiC 工艺制备出的 CVC SiC 和日本 Toshiba 公司研发的高强度反应烧结 SiC (NTSIC)就是典型的代

表<sup>[37,38]</sup>;二是在应用现有基底材料的前提下,开发出更加合理有效的 SiC 基底表面改性工艺方案。日本航天探测局研发了 SiSiC 稀浆涂布改性工艺,并将其应用在新一代 SPICA 红外天文望远镜项目中。美国 HDOS 公司和意大利 INAF 等机构分别应用 IBS 和 PE-CVD 工艺制备了非晶态的 SiC 改性层并得到了较高的改性效果<sup>[39,40]</sup>。

在国内,利用 CVD SiC 改性技术的制备温度仍过高,而且在制备较大口径基底的设备和工艺上出现了瓶颈,因此,找到低温条件下有效的沉积工艺,解决适合于大口径基底制备的设备和工艺问题是今后努力发展的方向。另一方面,利用 PVD Si 方法进行 SiC 基底表面改性的工艺已经较为成熟可靠,并取得了很好的效果,已能够满足当前空间工程应用的要求。由于 Si 改性层与 SiC 基底间仍存在一定的不匹配问题,热稳定性矛盾仍然存在。因此,为满足未来更高质量空间光学系统的应用需求,利用现有大型 PVD 工艺设备,找到一种能够在低温条件下制备出的,与基底匹

配更好的性能优良的 SiC 改性层也是今后努力发展的方向。

## 6 结束语

伴随着各国军事和航空航天事业的飞速发展,人类对空基高质量光学观测系统的性能要求也越来越高。SiC 基底反射镜是空间光学系统的重要组成部分,因此,掌握其高水平的空间应用技术尤为重要。为使我国在未来航空航天领域竞争中处于不败之地,必须大力自主发展 SiC 基底反射镜应用技术。当前,国内 SiC 基底材料处于初步应用阶段,制备工艺还有待进一步提高和完善。一方面,应加快高性能 SiC 基底材料研发工作的步伐,而另一方面,在性能更优的 SiC 基底材料研制出来前,还必须结合本国实际情况,针对现有的 SiC 基底材料,找到更加合理有效的表面改性工艺方案,以满足当前我国航空航天事业发展的迫切需求。

## 参考文献:

- [1] 杨秉新. 空间相机用碳化硅(SiC)反射镜的研究[J]. 航天返回与遥感,2003,24(1):15-18.  
YANG B X. Research of SiC reflection mirror for space camera[J]. *Spacecraft Recov. Rem. S.*,2003,24(1):15-18. (in Chinese)
- [2] 韩杰才,张宇民,赫晓东. 大尺寸轻型 SiC 光学反射镜研究进展[J]. 宇航学报,2001,22(6):124-132.  
HAN J C,ZHANG Y M,HE X D. Optical large scale lightweight SiC mirrors[J]. *J. Astronaut.*,2001,22(6):124-132. (in Chinese)
- [3] 申振峰,高劲松,陈红,等. 两种常用碳化硅反射镜基底表面改性的研究[J]. 光学技术,2009,35(1):21-24.  
SHEN ZH F,GAO J S,CHEN H,*et al.*. Research of the surface modification for two kinds of silicon carbide mirror in common use[J]. *Opt. Tech.*,2009,35(1):21-24. (in Chinese)
- [4] ZHOU H,ZHANG C R,CAO Y B,*et al.*. Lightweight C/SiC mirrors for space application[J]. *SPIE*,2006,6148:61480L.
- [5] 张舫,赵汝成,赵文兴. 大尺寸轻型碳化硅质镜体的制造与材料性能测试[J]. 光学精密工程,2006,14(5):759-763.  
ZHANG G,ZHAO R C,ZHAO W X. Fabrication and test of large scale light-weight SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(5):759-763. (in Chinese)
- [6] 陈红,高劲松,宋琦,等. 离子辅助制备碳化硅改性薄膜[J]. 光学精密工程,2008,16(3):381-385.  
CHEN H,GAO J S,SONG Q,*et al.*. Si modified coating on SiC substrate by ion beam assisted deposition[J]. *Opt. Precision Eng.*,2008,16(3):381-385. (in Chinese)
- [7] HADAWAY J B,ENG R,STAHL H P. Cryogenic performance of lightweight SiC and C/SiC mirrors[J]. *SPIE*,2004,5487:1018-1029.
- [8] 于海蛟,周新贵,张长瑞,等. SiC 反射镜及其制备工艺的研究进展[J]. 新技术新工艺,2006,5:26-30.  
YU H J,ZHOU X G,ZHANG CH R,*et al.*. Research progress of SiC reflecting mirror[J]. *New Technol. New Process*,

- 2006,5:26-30. (in Chinese)
- [9] 王彤彤,高劲松,王笑夷,等. 反应烧结碳化硅表面改性的初步研究[J]. 光学精密工程,2008,16(9):1604-1609.  
WANG T T,GAO J S,WANG X Y,*et al.*. Preliminary study of reaction bonded silicon carbide surface modification[J].  
*Opt. Precision Eng.*,2008,16(9):1604-1609. (in Chinese)
- [10] PALUSINSKI I A,GHOZEIL I. Developing SiC for optical system applications[J]. *SPIE*,2004,5524:14-20.
- [11] CASSTEVENS J,RASHED A,PLUMMER R,*et al.*. Silicon carbide high performance optics:a cost-effective, flexible fabrication process[J]. *SPIE*,2001,4451:458-467
- [12] EBIZUKA N,DAI Y T,ETO H,*et al.*. Development of SiC ultra light mirror for large space telescope and for extremely huge ground based telescope[J]. *SPIE*,2003,4842:329-334.
- [13] ZHANG X J,ZHANG Z Y,ZHENG L G,*et al.*. Manufacturing and testing SiC aspherical mirrors in space telescopes [J]. *SPIE*,2005,6024:602402.
- [14] LOGUT D,BREYSSEA J,TOULEMONT Y,*et al.*. Light weight monolithic silicon carbide telescope for space application [J]. *SPIE*,2005,5962:59621Q.
- [15] 唐裕霞,张舸. 大口径碳化硅轻质反射镜镜坯制造技术的研究进展[J]. 光学技术,2007,33(4):510-518.  
TANG Y X,ZHANG G. The development of fabrication techniques in large scale light-weighted SiC mirror blank[J].  
*Opt. Tech.*,2007,33(4):510-518. (in Chinese)
- [16] 韩媛媛,张宇民,韩杰才. 碳化硅反射镜技术的研究现状[J]. 材料导报,2005,19(4):5-8.  
HAN Y Y,ZHANG Y M,HAN J C. Current status of research on silicon carbide mirror technology[J]. *Materials Recov.*,2005,19(4):5-8. (in Chinese)
- [17] TANG H D,HUANG Z R,TAN S H,*et al.*. PVD SiC and PVD Si coatings on RB SiC for surface modification[J].  
*SPIE*,2006,149:61490A.
- [18] [http://www.nasa.gov/tech\\_days/tech\\_days\\_2006/docs](http://www.nasa.gov/tech_days/tech_days_2006/docs)
- [19] LOGUT D,BREYSSE J,TOULEMONT Y,*et al.*. Light weight monolithic silicon carbide telescope for space application [J]. *SPIE*,2005,5962:59621Q.
- [20] SEIN E,TOULEMONT Y,SAFA F,*et al.*. A 3.5 m diameter SiC telescope for Herschel mission[J]. *SPIE*,2003,4850:606-618.
- [21] RODOLFO J. Polishing, coating, and integration of SiC mirrors for space telescopes[J]. *SPIE*,2008,7018:70180E.
- [22] ENYA K,NAKAGAWA T,KANEDA H,*et al.*. Microscopic surface structure of C-SiC composite mirrors for space cryogenic telescopes[J]. *Appl. Opt.*,2007,46,(11):2049-2056.
- [23] 邓清,肖鹏,熊翔. 碳化硅轻型反射镜的研究进展[J]. 材料导报,2001,21(2):5-9.  
DENG Q,XIAO P,XIONG X. Development of lightweight silicon carbide mirror[J]. *Materials Recov.*,2001,21(2):5-9. (in Chinese)
- [24] RICH L,CROWE D. Polishing process for concave lightweight silicon coated silicon carbide optics[J]. *SPIE*,1995,2543:236-247.
- [25] LINDSTROM T,RONNOW D. Total integrated scattering from transparent substrates in the infrared region - validity of scalar theory[J]. *Opt. Eng.*,2000,39(2):478-487.
- [26] 申振峰,高劲松,陈红,等. 用自制总积分散射仪进行 SiC 基底表面改性效果评估[J]. 光学精密工程,2008,16(10):1841-1846.  
SHEN ZH F,GAO J S,CHEN H,*et al.*. Use self-made TIS scatterometer to evaluate the performance of the surface modification of silicon carbide mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*,2008,16(10):1841-1846. (in Chinese)
- [27] 刘桂玲,黄政仁,刘学建,等. 碳化硅表面改性和光学镜面加工的研究现状[J]. 无机材料学报,2007,22(5):769-774.  
LIU G L,HUANG ZH R,LIU X J,*et al.*. Recent developments of surface coatings and optical fabrication of silicon carbide[J]. *J. Inorg. Mater.*,2007,22(5):769-774. (in Chinese)
- [28] ENG R,CARPENTER J R,FOSS C A Jr,*et al.*. Cryogenic performance of a lightweight silicon carbide mirror[J].

*SPIE*,2005,5868;58680Q

- [29] 范镛,张忠玉,牛海燕,等. 碳化硅光学镜面加工[J]. *硅酸盐学报*,2003,31(11):1096-1100.  
FAN D,ZHANG ZH Y,NIU H Y,*et al.*. Surfacing fabrication of silicon carbide optical mirror[J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*,2003,31(11):1096-1100. (in Chinese)
- [30] RICH L,CROWE D. Polishing process for concave lightweight silicon-coated silicon carbide optics[J]. *SPIE*,2005,2543:236-247.
- [31] ANAPOL M,GARDNER L,TUCKER T. Lightweight 0.5 m silicon carbide telescope for a geostationary earth observatory mission[J]. *SPIE*,2005,2543:164-172.
- [32] MAGIDA M B,PAQUIN R A,RICHMOND J J. Dimensional stability of bare and coated reaction bonded silicon carbide [J]. *SPIE*,1990,1335:60-68.
- [33] 姚旺,张宇民,韩杰才. 碳化硅镜片材料的加工研究现状[J]. *材料科学与工艺*,2006,14(6):622-625.  
YAO W,ZHANG Y M,HAN J C. Surface machining of SiC reflector[J]. *Materials Sci. Technol.*,2006,14(6):622-625. (in Chinese)
- [34] KRÖDEL M R,OZAKI T,KUME M,*et al.*. Manufacturing and performance test of an 800 mm space optic[J]. *SPIE*,2008,7018:70180A.
- [35] 刘荣军,张长瑞,周新贵,等. CVD SiC 致密表面涂层制备及表征[J]. *材料工程*,2005,4:3-6.  
LIU R J,ZHANG CH R,ZHOU X G,*et al.*. Preparation and characterization of chemical vapor deposited dense SiC surface coatings[J]. *J. Mater. Eng.*,2005,4:3-6. (in Chinese)
- [36] 张剑寒,张宇民,韩杰才,等. 空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试[J]. *光学精密工程*,2006,14(2):79-184.  
ZHANG J H,ZHANG Y M,HAN J C,*et al.*. Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(2):179-184. (in Chinese)
- [37] FISCHER W F III,COLBY A F Jr. CVC silicon carbide high performance optical systems[J]. *SPIE*,2004,5523:90-299.
- [38] SUYAMA S,ITOH Y. NTSIC(New Technology Silicon Carbide)-evaluation of microstructure of high-strength reaction-sintered silicon carbide for optical mirror[J]. *SPIE*,2007,6666:66660K.
- [39] PAQUIN R A,MAGIDA M B,VERNOLD C L. Large optics from silicon carbide[J]. *SPIE*,1991,1618:53-60.
- [40] PARESCHI G,TAGLIONI G,BASSO S,*et al.*. Characterization of hydrogenated silicon carbide produced by plasma enhanced chemical vapor deposition at low temperature[J]. *SPIE*,2007,6666:66660B.

作者简介:高劲松(1968—),男,吉林白城人,博士,研究员,主要从事光学薄膜、特种光学薄膜及雷达隐身相关前沿领域的研究。E-mail:gaojs@ciomp.ac.cn