

文章编号 1674-2915(2013)06-0824-10

表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状

康健^{1,2}, 宣斌¹, 谢京江^{1*}

(1. 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;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对表面改性 SiC 基底反射镜在空间光学系统中的应用,总结了该类反射镜在国内外的研究现状。概括了碳化硅基底反射镜的发展趋势。介绍了常用的碳化硅材料,分析了它们的性质。给出了几种常用的碳化硅镜坯制备工艺,包括成型、改性和不同的抛光技术。通过对国内现有加工工艺和改性技术的分析,总结出了适应我国的表面改性碳化硅反射镜加工的发展方向。

关键词:光学加工;碳化硅;碳化硅反射镜;表面改性

中图分类号:TH706; TN304.24 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20130606.0824

Manufacture technology status of surface modified silicon carbide mirrors

KANG Jian^{1,2}, XUAN Bin¹, XIE Jing-jiang^{1*}

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: jxie@ciomp.ac.cn*

Abstract: On the basis of the applications of surface modified silicon carbide mirrors in space optical systems, this paper summarizes the research status and developing trends of this kinds of mirrors at home and abroad. It introduces the widely used silicon carbide materials and their different properties, then gives several kinds of preparation technics of the silicon carbide mirror blanks, such as moulding, modification and different polishing methods. Based on the analysis of manufacture and modification process, a way to improve the manufacture technology of silicon carbide mirrors in China is summed up.

Key words: optical manufacture; silicon carbide; silicon carbide mirror; surface modification

收稿日期:2013-10-10;修订日期:2013-11-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目

1 引言

随着航空航天工业的飞速发展,世界各国对于空间光学系统的分辨率提出了越来越高的要求。空间反射镜的材料不断进步,相应的加工技术也随之得到了较快的发展。20世纪的空间反射镜主要采用微晶玻璃,熔石英等低膨胀系数的光学玻璃,其特点是具有良好的抛光性,可加工成很好的光学表面。但其自身强度较低,抗热变形能力较差,同时难于进行轻量化处理,自身重量较大,大尺寸空间反射镜的制造难度很大。摆镜等空间反射镜多采用金属材料制成,主要使用铝和铍及其合金材料。铝及其合金材料具有抗变形能力差的特点,而铍及其合金则含有剧毒,对加工者身体损伤巨大,且价格较为昂贵。所以金属材料已不适用于现代的空间反射镜加工材料。自20世纪70年代开始,新一代的反射镜材料碳化硅(Silicon Carbide, SiC)和SiC基复合材料已开始应用于国外的空间反射镜加工中。SiC和SiC基复合材料具有质量轻、比刚度大、热稳定性好、导热性能良好等特点,完全满足空间反射镜对材料的物理性能、光学性能和工艺性能的要求。近年来,我国对于SiC材料的反射镜研究也取得了很大的进步,从材料的制备到光学加工等方面均有不同程度的提高,由我国自主研发的各类型表面改性SiC基底反射镜已逐步应用于空间光学系统中^[1-11]。

伴随着材料的更新换代,加工技术也必须适应新的材料而做出改进。受SiC基底制备技术的限制,基底中通常含有Si和SiC两相成分,或存在细微孔洞,这些都导致其无法通过直接加工获得低表面粗糙度的光学镜面^[11-12]。以往的加工经验通常认为SiC基底反射镜在初抛光至 $\lambda/10$ (RMS值)后需对其进行表面改性处理,以解决上述问题。继续对改性后的SiC镜体进行抛光,可获得较高质量的光学表面和较低的表面粗糙度。目前,SiC基底反射镜的加工技术较为多样化,但总体来说主要分为古典抛光法、计算机控制光学成型法、磁流变抛光法和离子束抛光法。

本文将近年来国内外SiC基底反射镜的发展

情况进行了系统性的总结,就我国SiC反射镜的加工技术进行了分析。

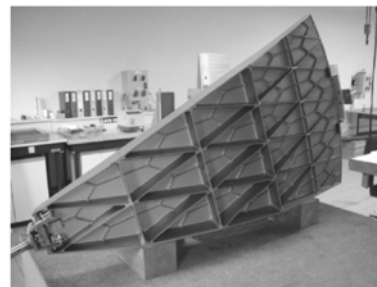
2 SiC基底反射镜应用现状

近年来,世界各国均将SiC基底反射镜作为研究重点。由于我国相关的研究起步较晚,目前仍处于相对落后的状态。

2.1 国际情况

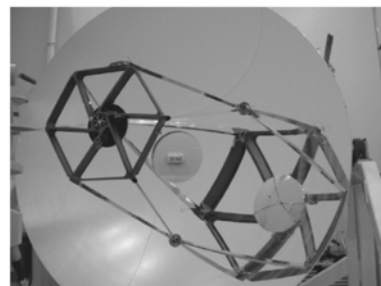
SiC基底反射镜的研究至今已有近40年的历史,自20世纪90年代以来发展迅速,各国均将其视为目前最为合适的空间反射镜材料,研究成果也颇为显著。

欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的Aladin主镜为口径1.5 m的SiC反射镜,通过化学气相沉积(CVD)改性并抛光后,其平均表面粗糙度为4.8 nm(RMS),总积分散射(Total Integrated Scattering, TIS)为 $(3.2 \pm 0.4)\% @ 355 \text{ nm}$ 。同为ESA的Herschel太空望远镜是目前世界上最大的空间望远镜,其主镜采用拼接技术,将12块扇形SiC焊接成为一个整体,制成直径为3.5 m的



(a) ESA Herschel 主镜扇形拼接块

(a) One of the 12 segments of the ESA Herschel



(b) ESA Herschel 主镜全貌

(b) Full view of ESA Herschel primary mirror

图1 ESA Herschel 主镜

Fig.1 ESA Herschel primary mirror

主反射镜(如图1)。焊接处使用Si合金,焊接处厚度通常小于0.05 mm。加工后的Herschel主镜表面粗糙度 R_a 值小于6 nm^[13]。

在美国,作为哈勃(Hubble)继任者的新一代太空望远镜JWST望远镜,第二代Hopkins紫外望远镜等空间项目,以及美国国家弹道导弹防御系统(NMD)中,SiC及其复合材料均得到了大量的应用^[14-15],同时,Eastman Kodak、POCO等公司已经实现了SiC材料反射镜的商品化^[9]。

2.2 国内情况

在我国,对于SiC材料及其复合材料的光学应用起步较晚,目前虽然在材料制备方面已基本做到与世界同步的水平,但在加工上仍处于相对落后的阶段。目前,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SiC反射镜应用技术的研制与开发,经过近年来的不断研究与改进,已取得了较为丰硕的成

果。近年来,由我国自主研发的多块SiC反射镜已成功应用于实际的空间光学系统中,均取得预期效果。

3 SiC材料的性质及常用种类

作为目前空间反射镜的首选材料,SiC及SiC基复合材料具有良好的机械性能与物理性能,相比其它材料优势明显。同时,根据不同的制备工艺,制造的SiC镜坯也存在较大差异。

3.1 SiC材料的性质

作为新型的空间光学反射镜材料,需要其具有比刚度大、导热性能好、热膨胀系数低等特点,同时材料密度要小,并可进行轻量化处理,降低镜体重量,还要具有较好的强度和硬度^[16-17]。只有满足上述各项需求,才能适应复杂的太空环境对于镜面的冲击。各种材料的物理性质对比如表1。

表1 SiC和传统反射镜材料的物理性质对比

Tab.1 Comparison of SiC and traditional mirror materials

样品	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	比刚度 $(E/\rho)/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1})$	热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6}\cdot\text{K}^{-1})$	导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热稳定系数 $(\lambda/\alpha)/(10^6\cdot\text{W}\cdot\text{m}^{-1})$
RB-SiC	3.04	330	112	2.4	170	71.43
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

由表1可知,SiC材料相比于其他各种空间反射镜的备选材料,其各项性能的优势较为明显,可较好地满足目前空间光学反射镜的使用要求,同时轻量化处理程度较高,虽然密度较大但反射镜重量却最低,可极大降低光学系统的整体质量,节约发射成本。如今已成为空间反射镜加工的首选材料。

3.2 常用的SiC种类

根据SiC制备工艺的不同,常用的SiC反射镜坯主要分为热压烧结SiC(HP-SiC)、反应烧结SiC(RB-SiC)、无压烧结SiC(Sintered SiC,S-SiC)和化学气相沉积SiC(CVD-SiC)。以目前的工艺

手段,HP-SiC很难制成形状较为复杂的反射镜镜坯,且镜坯尺寸较小,较难满足现阶段空间光学反射镜大口径化的趋势;S-SiC制备工艺复杂,制造设备昂贵;CVD-SiC同样存在造价昂贵,制备周期长,制备工艺相对复杂等不足。RB-SiC的制备工艺相对简单,反应烧结所需温度较低,制备周期短,造价相对较低,并可对其进行有效的轻量化处理,有利于制备大口径、结构复杂的空间反射镜镜坯,已广泛应用于我国现阶段空间反射镜的实验与加工中^[18-23]。表2给出了常用SiC各项技术指标对比。

表2 常用 SiC 技术指标对比

Tab.2 Specifications of the commonly used SiC

	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	组份	镜体各向同性	轻量化结构	尺寸	制备周期	表面改性	造价
HP-SiC	-3.20	SiC + 少量添加剂	较差	较难	较小	短	需要	高
RB-SiC	-3.04	SiC + Si	好	容易	大	较短	需要	低
S-SiC	-3.10	SiC + 少量添加剂	较好	较易	大	较长	需要	高
CVD-SiC	-3.21	SiC	最好	困难	小	长	不需要	高

4 SiC 基底反射镜加工技术分析

目前,世界各国对于 SiC 基底反射镜的加工流程已相对成熟。在我国,有关 SiC 反射镜的加

工技术在经过多年的研究和摸索后,已逐渐形成了一些较为完善的加工工艺,虽各有不同,但基本可分为成型(铣磨加工及粗抛光)、改性和抛光等几个阶段(如图2)。



图2 表面改性 SiC 反射镜加工工艺流程

Fig.2 Processing flow of manufacture of SiC mirror

4.1 成型

SiC 反射镜镜坯制造完成后,由于其面形偏差较大且具有较大的加工余量,首先要做的是零件的铣磨成型。对于非球面零件,通常的加工方式有两种,一种是将镜坯铣磨至比较半径的球面,再通过研磨修改为所需的非球面;另一种是通过数控加工中心直接将镜坯铣磨至要求的非球面。前者对于加工者的要求较高,在研磨及抛光阶段需要加工者根据经验将零件修整成所需的非球面,后者对于设备的精度要求更高,因此相对成本也高于前者。

无论应用上述哪种方法将镜坯铣磨成型后,都需要对 SiC 反射镜镜坯进行粗抛光加工。首先使用粒度较大的 SiC 粉或碳化硼粉进行粗磨。SiC 粉价格便宜,但由于其硬度较低,加工效率不高;碳化硼粉相对价格较高,但其硬度较高,可提高加工效率,通常采用碳化硼粉对 SiC 反射镜进行粗磨。粗磨后的 SiC 反射镜表面面形精度应小于 $20 \mu m$ (RMS 值)^[24]。粗磨后选用粒度较小的碳化硼粉或金刚石微粉对零件进行细磨。由于碳化硼的价格远低于金刚石微粉,且加工效率近似,因此细磨阶段多采用碳化硼粉作为研磨材料。细

磨后的 SiC 反射镜表面精度应小于 $1 \mu m$ (RMS 值),此后就可以对 SiC 反射镜进行粗抛光加工。对于非球面反射镜,若成型阶段采用的是第一种加工方式,则需在粗磨及细磨的阶段对镜面进行非球面的修整,以获得要求的非球面面形。

粗抛光阶段通常采用粒度适中的金刚石微粉进行抛光。根据多年的实验及实际加工经验,通常认为将反射镜基底抛光至 $\lambda/10$ (RMS) 左右后需对其进行改性处理。

4.2 改性

目前我国应用于实际工程的 SiC 反射镜的基底材料主要为 RB-SiC 和 S-SiC 两种。由于制备工艺的原因, RB-SiC 中含有 Si 和 SiC 两相成分,这就导致了在抛光时两种成分的去效率存在差异,容易在两相成分的连接处产生台阶效应。S-SiC 虽然成分单一,但实际加工成的反射镜镜坯仍难以做到理论上的完全致密,镜坯表面及内部仍存在大量孔洞。这就需要对粗抛光后的 SiC 反射镜基底进行改性处理^[25-28]。实践证明,改性处理可以有效地填补镜坯表面的细微孔洞,解决由于基底含有 Si 及 SiC 两相成分对镜面抛光所带来的不利影响,降低镜坯的表面粗糙度,使其能够

加工成更为理想的光学表面(如图3)。

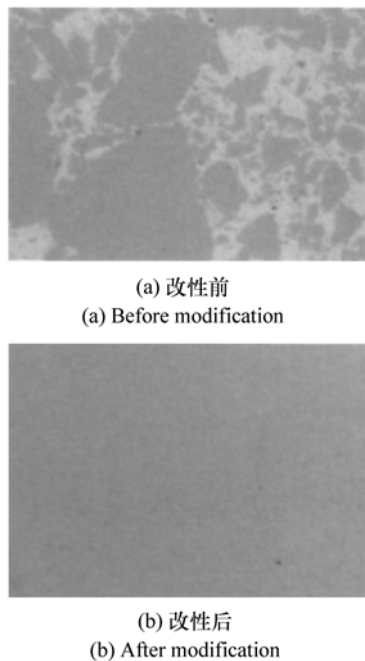


图3 改性前后 SiC 测试片表面照片对比(500 倍显微镜)

Fig.3 Microstructures of a SiC sample before and after modifications(500 ×)

目前国际上主要采用化学气相沉积法(Cheical Vaporous Deposition, CVD)和物理气相沉积法(Physical Vaporous Deposition, PVD)两种改性方法对 SiC 基底反射镜进行表面改性处理。CVD 改性处理虽然可以使 SiC 基底获得很好的改性层,但是由于 CVD 改性技术在改性过程中要求温度较高(通常在于 1 000 ℃),易使 SiC 基底产生应力,造成基底面形改变,同时在制备过程中会产生废气,需对废气进行处理,在一定程度上增加了加工成本。另外,我国目前尚不具备用于制备大口径基底的 CVD 改性设备。因此 CVD 改性技术更适用于相对较小口径的 SiC 基底反射镜的改性处理。PVD 改性技术不仅不需要很高的温度,同时通过 PVD 改性技术获得的改性层为单质 Si,既解决了基底中因含有 SiC 和 Si 两相成分对加工所带来的影响,且 Si 相对于 SiC 的硬度较低,更容易通过加工获得良好的光学表面^[29-36]。目前,我国用于制备大口径 SiC 基底的 PVD 改性设备相对成熟可靠。在国内,多家研究单位均对

SiC 基底反射镜的改性技术做了深入研究。其中,哈尔滨工业大学使用 CVD 改性技术对 ϕ 250 mm 反射镜表面进行改性处理,经抛光后基底表面粗糙度 R_a 达到了 1.478 nm^[37];中国科学院长春光学精密机械与物理研究所已经成功地运用 PVD 改性技术对一系列的大口径 SiC 反射镜进行了改性处理,改性效果良好。经加工后镜面的表面粗糙度 R_a 达到小于 0.6 nm 的水平^[38]。

4.3 抛光

为使 SiC 反射镜的面形精度达到设计要求,获得理想的光学表面,经改性处理后的 SiC 反射镜需要进行精抛光加工^[39]。目前常用的抛光包括古典抛光、计算机控制光学成型法、磁流变抛光以及离子束抛光。

4.3.1 古典抛光

随着科学技术的快速发展,众多的新型抛光法不断涌现,但古典抛光法仍然在各国光学抛光中占据重要地位,原因在于其具有较低的加工成本和较高的面形加工精度。古典抛光法中最重要的就是对于抛光模的硬度、抛光粉粒度、抛光液浓度等的选择,同时要求加工者熟练地控制主轴转速、摆架速度等加工参数。可以说,古典抛光法对于加工者的经验有较高的要求,同时针对口径较大,精度较高的元件的加工周期较长。因此,古典抛光法更适用于平面元件和中小口径的球面反射镜抛光。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的李俊峰等人利用基于古典抛光技术的双摆动抛光技术成功加工了多块 SiC 非球面反射镜,面形精度可稳定达到 $\lambda/30$ (RMS, @633 nm)^[40]。

4.3.2 计算机控制光学成型法

计算机控制光学成型法(小磨头技术)是一种基于计算机控制,使抛光盘以特定的速度和路径在光学元件表面运动,通过计算控制抛光盘在不同区域的驻留时间,使光学元件表面各部分的去除量得到精确控制,从而获得理想光学表面的数控抛光技术^[41]。实际上,计算机控制光学成型法是将不同的去除量转换为抛光盘在不同位置的驻留时间或抛光速度来实现对于面形的控制。计算机控制光学成型法适用于大口径非球面反射镜的加工,同时为了提高加工效率,可采用大直径与

小直径抛光盘相结合的方式组合式抛光。利用大直径的抛光盘消除镜面的中频误差,通过小直径的抛光盘来修整低频误差。同时配以手工抛光,可使零件在相对较短的时间内获得理想的面形精度。以美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)的大口径光学零件为例,波长介于 $0.12 \sim 33 \text{ mm}$ 为中频误差,主要对焦斑的拖尾和近场调制产生影响;波长大于 33 mm 为低频面形误差,主要影响反射镜的聚焦性能^[42-44]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的张峰等人利用计算机控制光学成型技术加工 $650 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的SiC离轴反射镜一块,面形精度为 0.023λ (RMS, @ 633 nm),表面粗糙度优于 1 nm ^[45],非球面数控加工设备如图4所示。



图4 非球面数控加工设备

Fig. 4 Computer controlled machine for aspheric surface

4.3.3 磁流变抛光

磁流变抛光技术是利用磁性流体对光学镜面

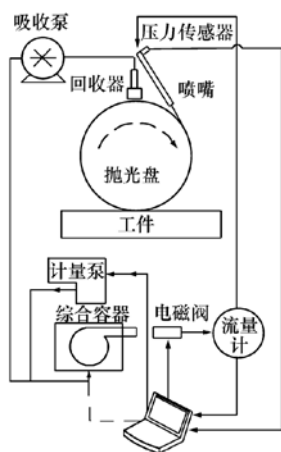


图5 磁流变液循环控制系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the magnetic rheological polishing

进行抛光的一种较为新型的抛光技术。其主要原理是将磁流变抛光液通过抛光盘循环地带入零件与抛光盘之间,而磁流变抛光液会在磁场的作用下形成柔性抛光模,从而在其运动过程中对零件的表面材料产生去除作用^[46]。图5给出了磁流变抛光系统的控制原理示意图。

自20世纪70年代日本学者首次通过磁流变技术对光学元件表面进行研磨实验后,越来越多的人通过各种不同的方法将磁场辅助技术应用于光学抛光中。在我国,西安工业大学的王芳杰等人通过磁流变技术将初加工后未经研磨的SiC元件直接进行磁流变抛光,表面粗糙度 R_a 达到了 0.52 nm ^[47],中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的张峰等人通过磁介质辅助抛光技术将SiC元件的面形误差修正至 0.015λ ,表面粗糙度 R_a 达到 0.64 nm 。以上实验均证明了磁流变抛光技术适用于SiC元件的抛光加工^[48]。

4.3.4 离子束抛光

离子束抛光技术是一种通过离子源发射离子束轰击光学零件表面产生物理溅射效应去除面形误差的新型抛光技术,近年来已逐渐应用于大口径光学元件的加工。离子束抛光技术的加工效率较高,加工精度要求在 $\lambda/10$ 至 $\lambda/30$ 的 $\phi 70 \text{ mm}$ 的球面零件仅需不到1 h。但同时,高昂的设备费用使得离子束抛光技术并不能得到广泛的应用,目前国内仅有国防科技大学,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等几家单位开展了相关的实验及加工工作。国防科技大学的廖文林等人使用离子束抛光技术对 $125 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的SiC离轴反射镜进行加工,全口径RMS值达到

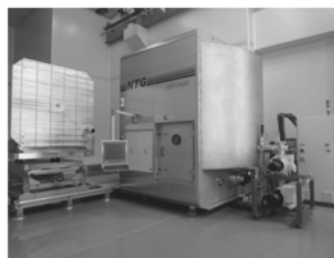


图6 离子束抛光设备

Fig. 6 Ion beam polishing equipment

0.046λ ^[49],中国科学院长春光学精密机械与物理

研究所的张峰应用离子束抛光技术对600 mm × 200 mm 的空间相机表面改性 SiC 平面反射镜进行抛光,最终面形精度达到 0.014λ (RMS 值),表面粗糙度达到 0.71 nm (RMS 值)^[50]。

5 结束语

随着世界各国航空航天事业及军事方面的飞速发展,SiC 基底反射镜的应用已经越来越广泛。目前,我国现有的表面改性 SiC 基底反射镜的加

工技术受限于加工经验、加工设备等各方面的因素,且尚处于起步阶段,与国际领先水平仍存在明显差距,但各研究机构通过多年的努力已取得十分明显的进步。为使我国在国际竞争中处于领先地位,根据国内现有研究条件,只有进一步改进并完善现有加工工艺,以计算机控制光学成型技术为基础,根据不同加工需求配合多种不同种类的抛光技术,即以组合式抛光技术进行光学加工,以实现目标精度要求,更好地适应我国航空航天事业发展的需求。

参考文献:

- [1] EALEY M A, WEAVER Q. Development history and trends for reaction bonded silicon carbide mirrors[J]. *SPIE*, 1996, 2856:66-72.
- [2] 范锦. 碳化硅光学表面抛光机理研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(022202):022202-1-022202-4.
FAN D. Study on the polishing mechanism of Silicon Carbide optical surface[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2012, 49(022202):022202-1-022202-4. (in Chinese)
- [3] 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. Astronautics*, 2001, 22(6):124-132. (in Chinese)
- [4] 张长瑞, 周新贵, 曹英斌, 等. SiC 及其复合材料轻型反射镜的研究进展[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(2):14-19.
ZHANG CH R, ZHOU X G, CAO Y B, et al. The development of light-weight optics made of SiC and SiC matrix composites[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2003, 24(2):14-19. (in Chinese)
- [5] 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 Recovery and Remote Sensing*, 2003, 24(1):15-18. (in Chinese)
- [6] TOBIN E, MAGIDA M, KISHNER S, et al. Design, fabrication and test of a meter-class reaction bonded SiC mirror blank[J]. *SPIE*, 1995, 2543:12-21.
- [7] 张玉娣, 周新贵, 张长瑞. C_r/SiC 陶瓷基符合材料的发展与应用现状[J]. 材料工程, 2005(4):60-63.
ZHANG Y D, ZHOU X G, ZHANG CH R. Development and application of C_r/SiC ceramic matrix composites[J]. *Material Eng.*, 2005(4):60-63. (in Chinese)
- [8] ZHANG J H, ZHANG Y M, HAN J C, et al. Design and fabrication of large-scale lightweight SiC space mirror[J]. *SPIE*, 2006, 6148:61480U1-61480U6.
- [9] ZHOU H, ZHANG CH R, CAO Y B, et al. Lightweight C/SiC mirrors for space application[J]. *SPIE*, 2006, 6148:61480L1-61480L6.
- [10] 高劲松, 申振峰, 王笑夷, 等. SiC 空间反射镜材料及其表面改性技术现状分析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(2):71-78.
GAO J S, SHEN ZH F, WANG X Y, et al. Research status of SiC space mirror material and its surface modification[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2009, 2(2):71-78. (in Chinese)
- [11] 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]. *Optical Technique*, 2009, 35(1):21-24. (in Chinese)
- [12] BOUGOIN M, LAVENAC J. From HERSCHEL to GAIA, 3-meter class SiC space optics[J]. *SPIE*, 2011, 8126:81260V-1-81260-10.

- [13] SUGANUMA M, KATAYAMA H, NAITOH M, *et al.*. Development and tests of interferometry facility in 6-m diameter radiometer thermal vacuum chamber in Tsukuba Space Center[J]. *SPIE*, 2010, 7731: 77313X-1-77313X-7.
- [14] KORHONEN T, KEINANEN P, PASANEN M, *et al.*. Polishing and testing of the 1.5 m SiC mirror of the ALADIN instrument on the ADM-Aeolus satellite of ESA[J]. *SPIE*, 2008, 7102: 710219-1-710219-7.
- [15] 赵文星, 张舸, 赵汝成, 等. 轻质碳化硅质反射镜坯体的制造工艺[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2609-2617.
ZHAO W X, ZHANG G, ZHAO R CH, *et al.*. Fabrication of silicon carbide lightweight mirror blank[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2609-2617. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 张舸, 赵汝成, 赵文星. 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 CH, ZHAO W X. Fabrication and test of large scale light-weight SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 759-763. (in Chinese)
- [18] ZHANG Y M, ZHOU Y F, HAN J C, *et al.*. Preparation of silicon coating on SiC mirror by EB-PVD[J]. *SPIE*, 2006, 6149: 61492C1-61492C5.
- [19] 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): 179-184.
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)
- [20] 张舸, 赵汝成, 赵文星. 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 J. Space Sci.*, 2011, 31(3): 401-405. (in Chinese)
- [21] 唐惠东, 李龙珠, 孙媛媛, 等. SiC 反射镜镜坯制备工艺的综述与探讨[J]. *佛山陶瓷*, 2011, 8: 16-21.
TANG H D, LI L ZH, SUN Y Y, *et al.*. Development of SiC mirror blank preparation technics[J]. *Foshan Ceramics*, 2011, 8: 16-21. (in Chinese)
- [22] 彭晓英, 陈玉峰. 轻型碳化硅陶瓷反射镜材料研究进展[J]. *中国陶瓷*, 2009, 45(4): 9-12.
PENG X Y, CHEN Y F. The development research of reflective porcelain materials with lightweight silicon carbide[J]. *China Ceramics*, 2009, 45(4): 9-12. (in Chinese)
- [23] 康念辉, 李圣怡, 郑子文, 等. 典型碳化硅光学材料的超光滑抛光试验研究[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(21): 2528-2532.
KANG N H, LI S Y, ZHENG Z W, *et al.*. Experimental research on super-smooth polishing process of typical silicon carbide materials[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(21): 2528-2532. (in Chinese)
- [24] JOHNSON S. SiC coatings on RB SiC mirrors for ultra-smooth surfaces[J]. *SPIE*, 1993, 2018: 237-247.
- [25] 苑永涛, 刘红, 陈益超, 等. RB-SiC 高致密、超光滑 SiC 表面改性涂层的制备[J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(6): 74-77.
YUAN Y T, LIU H, CHEN Y CH, *et al.*. Preparation of high compact and super-smooth SiC surface modification coating on RB-SiC mirror[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2011, 32(6): 74-77. (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] 唐惠东, 李龙珠, 孙媛媛, 等. SiC 反射镜表面改性研究进展[J]. *江苏陶瓷*, 2011, 44(6): 8-12.
TANG H D, LI L ZH, SUN Y Y, *et al.*. Research development of surface modification of SiC mirror[J]. *Jiangsu Ceramics*, 2011, 44(6): 8-12. (in Chinese)

- [28] TANG H D, HUANG Z R, TAN S H. PVD SiC and PVD Si coatings on RB SiC for surface modification[J]. *SPIE*, 2006, 6149:61490A1-61490A2.
- [29] ZHANG F. Optical characteristics of silicon modified on silicon carbide surface[C]. Proceedings of International Conference on Frontiers of Laser Processing, Changchun, P. R. China: ICFL, 2011.
- [30] 苑永涛, 刘红, 邵传兵, 等. RB-SiC 表面改性 Si 涂层的制备与性能[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(5):1281-1284.
YUAN Y T, LIU H, SHAO CH B, *et al.*. Preparation and performance of Si coating on RB-SiC mirror for surface modification[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(5):1281-1284. (in Chinese)
- [31] 申振峰, 高劲松, 陈红, 等. 空间用 SiC 反射镜表面改性的性能和可靠性评估[J]. 光子学报, 2009, 38(9):2353-2357.
SHEN ZH F, GAO J S, CHEN H, *et al.*. Performance and reliability evaluation for the surface modification of space used silicon carbide mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9):2353-2357. (in Chinese)
- [32] SHEN ZH F, GAO J S. Surface modification of SiC mirror by IARE method[J]. *SPIE*, 2011, 7995:799521-1-799521-4.
- [33] SHEN ZH F, GAO J S. Using DLC buffer layer to improve the effect of surface modification of RB-SiC mirror by SiC coating[C]. Proceedings of International Conference on Frontiers of Laser Processing, Changchun, P. R. China: ICFL, 2011.
- [34] 蒋芳, 杨勇, 黄政仁. 反射镜用 SiC 陶瓷表面改性涂层的研究进展[J]. 机械工程材料, 2012, 36(12):1-4.
JIANG F, YANG Y, HUANG ZH R. Research progress of SiC ceramic surface modification with coating for mirror[J]. *Materials Mechanical Eng.*, 2012, 36(12):1-4. (in Chinese)
- [35] 高劲松, 申振峰, 王笑夷, 等. 空间反射镜基底材料碳化硅表面改性研究[J]. 光学学报, 2009, 29(9):2624-2629.
GAO J S, SHEN ZH F, WANG X Y, *et al.*. Research on surface modification of space used SiC mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9):2624-2629. (in Chinese)
- [36] JOSEPH R, DEEPAK S, CHRIS W, *et al.* Silicon carbide optics for space and ground based astronomical telescopes[J]. *SPIE*, 2012, 8450:845002-1-845002-8.
- [37] 高明辉, 刘磊, 任建岳. 空间相机反射镜碳化硅材料性能测试[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8):1170-1174.
GAO M H, LIU L, REN J Y. Characteristic test of SiC for space camera's mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1170-1174. (in Chinese)
- [38] 张峰, 范镐, 高劲松. 碳化硅表面硅改性层的特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(032202):032202-1-032202-5.
ZHANG F, FAN D, GAO J S. Study on characteristics of silicon modification layer on silicon carbide surface[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2012, 49(032202):032202-1-032202-5. (in Chinese)
- [39] 王孝坤. 大口径离轴碳化硅非球面反射镜加工与检测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(011201):011201-1-011201-5.
WANG X K. Fabrication and testing of large aperture off-axis SiC aspheric mirror[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2012, 49(011201):011201-1-011201-5. (in Chinese)
- [40] 李俊峰, 宋淑梅. 应用双摆动技术加工离轴碳化硅反射镜[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8):1669-1675.
LI J F, SONG S M. Manufacture of SiC off-axis aspheric mirrors by double-swing method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8):1669-1675. (in Chinese)
- [41] 李圣怡, 戴一帆, 解旭辉, 等. 大中型光学非球面制造与测量新技术[M]. 国防工业出版社, 2011:92-96.
LI S Y, DAI Y F, XIE X H, *et al.*. *New Technology for Manufacturing and Measurement of Large and Middle-scale Aspheric Surfaces*[M]. National Defense Industry Press, 2011:92-96. (in Chinese)
- [42] AIKENS D M. The origin and evolution of the optics specifications for the National Ignition Facility[J]. *SPIE*, 1995, 2536:2-12
- [43] ENGLISH R E, AIKENS D M, WHISTLER W T, *et al.*. Implementation of ISO 10110 optics drawing standards for the National Ignition Facility[J]. *SPIE*, 1995, 2536:51-56.
- [44] WANG D Y, ENGLISH R E J, AIKENS D M. Implementation of ISO 10110 optics drawing standards for the National Ignition Facility[J]. *SPIE*, 1999, 3782:502-508.

- [45] 张峰,徐颖娣,范楠,等. 表面改性非球面碳化硅反射镜的加工[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2479-2484.
ZHANG F,XU L D,FAN D,*et al.*. Fabrication of surface modification aspheric SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(12):2479-2484. (in Chinese)
- [46] 袁志刚,唐才学,郑楠,等. 磁流变数控抛光技术研究[J]. 制造业自动化,2013,35(1):48-51.
YUAN ZH G,TANG C X,ZHENG N,*et al.*. The research on magnetorheological finishing[J]. *Manufacturing Automation*,2013,35(1):48-51. (in Chinese)
- [47] 王芳杰,郭忠达,阳志强,等. 单晶碳化硅磁流变抛光工艺实验研究[J]. 科技创新导报,2010,32(11):112-113.
WANG F J,GUO ZH D,YANG ZH Q,*et al.*. Study on magnetorheological polishing process of single crystal silicon carbide[J]. *Science and Technology Innovation Herald*,2010,32(11):112-113. (in Chinese)
- [48] 张峰,邓伟杰. 碳化硅表面硅改性层的磁介质辅助抛光[J]. 光学学报,2012,32(11):1116001-1-1116001-6.
ZHANG F,DENG W J. Magnetic-Medium assistant polishing of silicon modification layer on silicon carbide surface[J]. *Acta Optica Sinica*,2012,32(11)1116001-1-1116001-6. (in Chinese)
- [49] 廖文林,戴一帆,周林,等. 离子束抛光加工矩形离轴非球面镜[J]. 国防科技大学学报,2011,33(1):100-104.
LIAO W L,DAI Y F,ZHOU L,*et al.*. Ion beam figuring for rectangular off-axis aspheric mirrors[J]. *J. National University of Defense Technology*,2011,33(1):100-104. (in Chinese)
- [50] 张峰. 空间相机碳化硅反射镜表面硅改性层的组合式抛光[J]. 中国激光,2013,40(7):0716001-1-0716001-5.
ZHANG F. Combined type polishing of silicon modification layer on silicon carbide mirror for space camera[J]. *Chinese J. Lasers*,2013,40(7):0716001-1-0716001-5. (in Chinese)

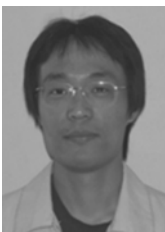
作者简介:



康健(1984—),男,吉林长春人,硕士研究生,2007年于长春理工大学获得学士学位,主要从事大口径非球面加工及检测方面的研究。E-mail:kangjian0116@hotmail.com



谢京江(1954—),男,北京人,研究员,博士生导师,主要从事先进光学精密加工与检测方面的研究。E-mail:jjxie@ciomp.ac.cn



宣斌(1983—),男,江苏南通人,博士,副研究员,2005年于浙江大学获得学士学位,2010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,主要从事光学检测及中频误差方面的研究。E-mail:xbjsnt@sina.com