

## 《光学系统集成制造技术》专题导读

张学军

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

国内外多年的发展历程表明,复杂光学系统的研制过程,是一个多学科相互交叉、相互促进的过程。光学系统集成制造技术是光学材料、光学设计、光机结构、非球面加工检测、系统装调等各单元技术的有机结合。

为了获得较高的分辨本领,空间相机一般采用长焦距、大口径光学系统。因此,对空间相机反射镜提出了更高的要求。反射镜材料除了具备所要求的光学特性外,还应该具有比刚度高、热变形系数小、导热性能良好等综合特性。由于SiC材料具有较高的弹性模量,适中的密度,较小的热膨胀系数,较高的导热系数和耐热冲击性,具备较高的比刚度及尺寸稳定性等一系列优秀的物理性质,特别适合于空间反射镜制造,因此SiC深受国内外研究机构的青睐,研究人员正将其作为空间相机反射镜镜体的首选材料。本专栏详细讨论了基于SiC材料的空间相机研制的部分关键问题,包括SiC反射镜的表面离子辅助镀硅改性技术、表面改性非球面SiC反射镜的加工技术、大口径SiC材料凸非球面反射镜检验技术以及基于SiC材料的反射镜支撑及长焦距大视场轻型高分辨空间相机光机结构设计。

《表面改性非球面碳化硅反射镜的加工》、《空间RB-SiC反射镜的表面离子辅助镀硅改性技术》从工艺角度研究了碳化硅反射镜表面改性技术以及改性后非球面SiC反射镜的加工技术。研究了改性层的性能,以Si膜的抛光机理为依据对改性层进行了大量抛光工艺实验和表面质量测试,获得了关键的抛光工艺参数,初步确定了SiC非球面反射镜研抛工艺规范。论文对SiC反射镜的改性及改性层加工工艺的研究将为我国大口径、超光滑、轻型空间反射镜制造技术提供重要的技术支持。

《长焦距大视场光学系统的光机结构设计》一文,研究了长焦距大视场轻型离轴三反空间相机光机结构设计技术,基于SiC材料空间反射镜,采用适合于轻型高分辨空间相机的桁架结构,对离轴TMA系统的支撑结构进行静力学、动力学建模,优化结构形式,采用光机热集成分析方法指导、评价和优化相机光机结构设计过程,提高结构固有频率,增强相机热稳定性适应范围。采用本文的设计方法能够提高相机固有频率,且重力变形、抗振性能、热变形等方面均能满足使用要求。

《大口径碳化硅材料凸非球面反射镜的检验》一文,研究了SiC凸非球面补偿检验方案,采用会聚光束对SiC凸非球面反射镜进行正面检验。文中所述补偿器的设计方法和要求具有普遍性,设计结果也可用于同类型大口径凸非球面检测用补偿器的设计。采用该方法提高了凸非球面检测精度,并且在凸非球面镜的材料选择、结构设计、支撑方式等方面提供了更多的优化空间,为新型光学材料在凸非球面反射镜的应用铺平了道路。

上述4篇文章探讨了光学系统集成制造的部分单元技术,为该领域注入了若干新思想。希望这些文章能对从事相关技术研究的读者有所帮助。

文章编号 1004-924X(2008)12-2479-06

# 表面改性非球面碳化硅反射镜的加工

张峰,徐领娣,范镛,高劲松,张学军

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春130033)

**摘要:**为了获得高质量光学表面的非球面碳化硅(SiC)反射镜,对碳化硅反射镜表面改性技术以及离子束辅助沉积(IBAD)Si改性后的非球面碳化硅反射镜的加工技术进行了研究。介绍了碳化硅反射镜表面改性技术以及本文所采用的离子束辅助沉积(IBAD)Si的改性方法。然后,采用氧化铈( $\text{CeO}_2$ )、氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )以及二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )等各种抛光液对离子束辅助沉积(IBAD)Si的碳化硅样片进行抛光实验。最后,在上述实验的基础上,采用计算机控制光学表面成型(CCOS)技术对尺寸为650 mm×200 mm的表面改性离轴非球面碳化硅反射镜进行加工。实验结果表明: $\text{CeO}_2$ 抛光液的抛光效率较高;使用 $\text{SiO}_2$ 抛光液抛光后的样片表面质量最好;表面改性离轴非球面碳化硅反射镜加工后的最终检测结果为:实际使用口径内的面形精度(RMS值)为 $0.016\lambda(\lambda=0.6328\ \mu\text{m})$ ,表面粗糙度为 $0.85\ \text{nm}(R_q\text{值})$ 。反射镜的加工结果满足设计技术指标的要求。

**关键词:**离轴非球面;碳化硅反射镜;计算机控制光学表面成型;表面改性

**中图分类号:**TH703;O484.1 **文献标识码:**A

收稿日期:2008-08-15;修订日期:2008-10-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60108003)

# Fabrication of surface modification aspheric SiC mirror

ZHANG Feng, XU Ling-di, FAN Di, GAO Jin-song, ZHANG Xue-jun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to manufacture fine optical surface of aspheric silicon carbide(SiC) mirror, several surface modification technologies for SiC mirror are introduced, and the fabrication of surface modification aspheric SiC mirror is studied. The surface modification method on SiC mirrors by Ion Beam Assisted Deposition(IBAD)-Si is described especially. Then, several polishing agents, such as  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$ , are used in experiments for polishing SiC samples with surface modification. Finally, on the basis of experiments, a 650 mm $\times$ 200 mm off-axis aspheric SiC mirror with surface modification is manufactured by the technology of Computer-controlled Optical Surfacing(CCOS). Experimental results indicate that a higher polishing efficiency is acquired with polishing agent of  $\text{CeO}_2$  and the best optical surface is fabricated with polishing agent of  $\text{SiO}_2$ . The tested results indicate that surface accuracy of the aspheric SiC mirror with surface modification is  $0.016\lambda(\text{RMS})(\lambda=0.6328\ \mu\text{m})$  and surface roughness of the mirror is  $0.85\ \text{nm}(\text{RMS})$ , which can satisfy the desired optical performance.

**Key words:** off-axis aspherics; SiC mirror; Computer-controlled Optical Surfacing(CCOS); surface modification

## 1 引言

随着对空间相机分辨率的要求越来越高,在光学系统衍射极限条件的约束下,迫使光学元件的尺寸越来越大,因此对空间相机反射镜提出了更高的要求。空间相机反射镜材料除了具备所要求的光学特性外,还应该具有比刚度大、热变形系数小、导热性能良好等综合特性。比刚度大,可增大径厚比,减少反射镜重量,可降低对支撑结构的要求;热变形系数小、导热性良好,则相机对恶劣环境适应性好,可降低对热控系统的要求。目前用于制作空间反射镜镜体常用的材料有:超低线胀玻璃、微晶玻璃、铍以及碳化硅等。通过对这些材料物理性能的对比分析可以知道,碳化硅的比刚度比玻璃材料好,接近铍(有毒),而碳化硅的热变形系数是最小的,因此碳化硅深受国内外研究机构青睐,被研究人员作为空间相机反射镜镜体的首选材料<sup>[1-4]</sup>。

## 2 碳化硅反射镜表面改性技术简介

目前碳化硅是用作空间相机反射镜镜体的热门材料之一,它属于陶瓷材料,表面致密程度远不如玻璃材料,且加工性能差。因此,要获得高质量光学表面的碳化硅反射镜,就必须对碳化硅表面进行改性。国际上普遍采用的是在碳化硅表面镀制一层致密碳化硅或者硅的方法,来达到表面改性的目的,进而通过精细抛光进一步达到很好的粗糙度要求。

在碳化硅表面改性方面,国内外诸多学者都做了大量的研究工作,并取得了卓有成效的成果<sup>[5-7]</sup>。主要的表面改性方法有:化学汽相沉积(Che-mical Vapour Deposition, CVD)、反应溅射以及离子束辅助沉积(Ion Beam Assisted Deposition, IBAD)等方法。CVD采用硅烷和碳氢化合物混合气体产生辉光放电,在阴极上得到SiC,其成分由硅烷与碳氢化合物的比例来控制。缺点是

使用危险性气体硅烷,反应要在 $>1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 下进行,这样高的温度将导致 SiC 和衬底之间的界面粗化,甚至产生高密度的空洞和高密度的晶格缺陷,而且这种方法所需设备要求高,花费高昂。反应溅射法采用 Ar 和碳氢化合物混合气体溅射 Si 靶或 Si、C 混合靶,其缺点是 Si 靶上易生长无定形碳膜,从而抑制 Si 的溅射,难以得到质量高的 SiC 薄膜。IBAD 方法是近年来得到迅速发展的一种新型薄膜辅助生长方法。该方法具有反应温度低( $200\ ^\circ\text{C}$ 左右),制备参数可控制性强,重复性好,维护简单等优点,一方面可以增加沉积材料到达基片的动能,使其与基片结合更加牢固;另一方面可以提高薄膜晶化程度,使薄膜生长致密,消减生长过程中产生的应力,尤其适合于工程应用。

长春光学精密机械与物理研究所现有的仪器设备为基础,考虑到过高的温度容易造成碳化硅镜坯受损等因素,采用 IBAD Si 的改性技术对碳化硅表面进行改性<sup>[8]</sup>。对改性后的 SiC 样片表面进行精密光学加工,检测结果表明,改性后的 SiC 样片表面质量明显提高。

图 1 是在  $500\times$  显微镜下观察到的改性前后 SiC 样片经光学加工后的微观结构。从图 1 中可以看到,改性前 SiC 样片经过精密抛光后表面仍有许多小凹坑,结构不够致密,改性后 SiC 样片经过精密抛光后表面小凹坑消失,其结构致密程度也大大提高。

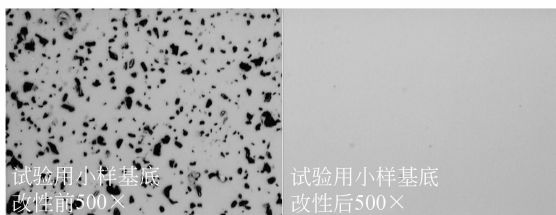


图 1 改性前后碳化硅样片表面质量对比(放大  $500\times$ )  
Fig. 1 Microstructures of SiC sample before and after modifications

图 2 为改性前后 SiC 样片以及微晶玻璃经过抛光镀膜后的反射率曲线。从图 2 中可以看到,改性后 SiC 样片表面反射率明显提高,已经接近微晶玻璃的反射率。

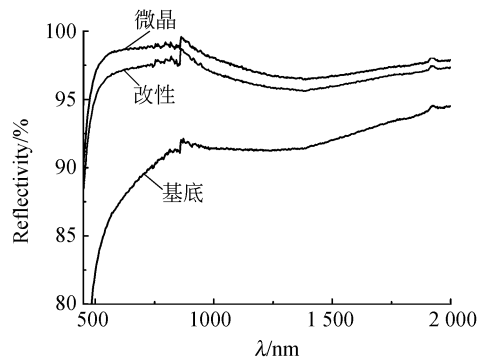


图 2 改性前后碳化硅样片表面反射率对比  
Fig. 2 Reflectivities of SiC sample before and after modifications

### 3 表面改性非球面碳化硅反射镜加工

非球面碳化硅反射镜的加工采用计算机控制光学表面成型(Computer-control Optical Surface, CCOS)技术。CCOS 技术的加工原理是通过计算机控制小磨头在工件表面的运动轨迹以及不同位置的驻留时间,来实现对工件表面面形的修正。

为了实现对离轴非球面碳化硅反射镜的加工,本课题组自行研制了 FSGJ-2 非球面数控加工中心。FSGJ-2 非球面数控加工中心是一台建立在 CCOS 技术基础上集研磨、研磨阶段的在线检测以及抛光于一体的非球面自动制造机床。改性前后非球面碳化硅反射镜的加工都是在该加工中心进行的。

以 IBAD 方法在碳化硅表面镀一层硅后,其表面加工特性完全改变。为此,在 FSGJ-2 非球面数控加工中心进行了几种抛光液对硅改性层的抛光试验,以便得到适合硅改性层抛光的较为理想的抛光液。

#### 3.1 表面改性碳化硅样片加工试验

##### 3.1.1 几种抛光液的抛光效率

分别采用水基微米级氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、水基微米级氧化铈( $\text{CeO}_2$ )以及有机溶剂基纳米级氧化硅( $\text{SiO}_2$ ) 3 种抛光液对改性碳化硅样片进行抛光。具体试验条件如下:实验室温度为 $(25\pm 0.5)\ ^\circ\text{C}$ ,抛光头直径为  $40\ \text{mm}$ ,抛光模采用半号沥青,表面改性碳化硅样片直径为  $80\ \text{mm}$ ,抛光头采用平摆动运动方式,偏心距为  $8\ \text{mm}$ ,抛光头压力为

0.2 MPa, 抛光轴转速为 200 r/min, 抛光时间为 10 min。

表 1 中给出 3 种抛光液对改性层抛光的材料去除情况。从表 1 中可以看到,  $\text{CeO}_2$  抛光液和  $\text{SiO}_2$  抛光液的材料去除率相当, 而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  抛光液的抛光效率较低。

表 1 几种抛光液对改性碳化硅的材料去除

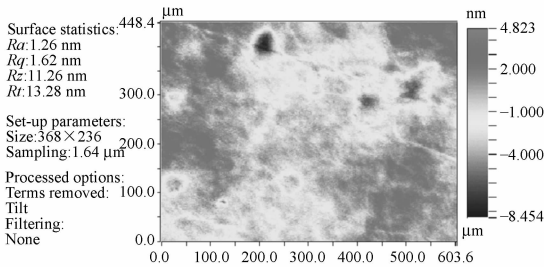
Tab.1 Material removal by several kinds of polishing agents

抛光液	材料去除量 ( $\mu\text{m}$ )	材料去除率 ( $\text{nm}/\text{min}$ )
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.268	26.8
$\text{CeO}_2$	0.54	54
$\text{SiO}_2$	0.543	54.3

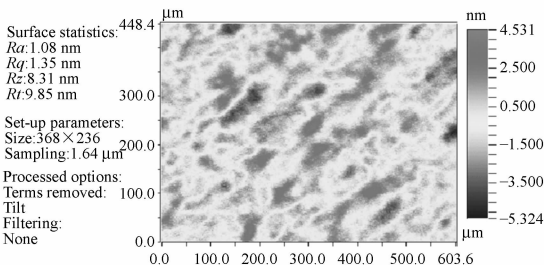
### 3.1.2 几种抛光液抛光后样片的光学表面粗糙度

试验条件同上, 抛光时间为 10 h。抛光完毕后, 用 WYKO 表面粗糙度测量仪对被上述各种抛光液抛光的改性碳化硅样片表面粗糙度进行检测, 检测结果如图 3 所示。

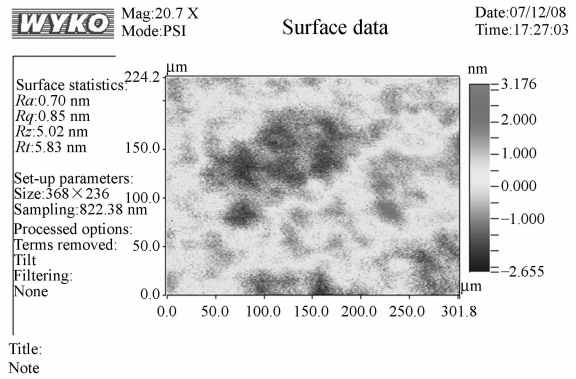
从图 3 中可以看到, 采用  $\text{SiO}_2$  抛光液抛光后的改性碳化硅样片表面粗糙度最好, 采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  抛光液抛光后的改性碳化硅样片表面粗糙度最差。



(a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  抛光 IBAD-Si, 粗糙度  $R_q$  值为 1.62 nm  
(a) Polishing agent  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , surface roughness is 1.62 nm ( $R_q$ )



(b)  $\text{CeO}_2$  抛光 IBAD-Si, 粗糙度  $R_q$  值为 1.35 nm  
(b) Polishing agent  $\text{CeO}_2$ , surface roughness is 1.35 nm ( $R_q$ )



(c)  $\text{SiO}_2$  抛光 IBAD-Si, 粗糙度  $R_q$  值为 0.85 nm  
(c) Polishing agent  $\text{SiO}_2$ , surface roughness is 0.85 nm ( $R_q$ )

图 3 各种抛光液抛光后改性碳化硅样片表面粗糙度  
Fig. 3 Surface roughness of modification SiC samples polished by different polishing agents

从上述试验可以发现,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  抛光液不适合于 IBAD-Si 的碳化硅样片的抛光。  $\text{CeO}_2$  抛光液和  $\text{SiO}_2$  抛光液可以用于 IBAD-Si 碳化硅样片的抛光。

## 3.2 表面改性非球面碳化硅反射镜的加工

非球面碳化硅 (SiC) 反射镜的加工是在 FS-GJ-2 非球面数控加工中心进行的, 主要分为改性前非球面碳化硅反射镜基底的加工和改性后反射镜表面改性层的加工。下面以具体实例来研究改性非球面碳化硅反射镜的加工技术。待加工反射镜是尺寸为  $650 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  的离轴椭球面, 材料为碳化硅, 非球面二次项系数  $K = 0.012$ , 离轴量为  $75.32 \text{ mm}$ , 含有六次项系数。

### 3.2.1 非球面碳化硅反射镜基底的加工

FSGJ-2 非球面数控加工中心将定量的检测数据转化成加工文件, 通过计算机控制小磨头在反射镜表面不同位置的驻留时间, 从而完成对非球面的面形修正。图 4 为碳化硅非球面反射镜基底加工的实物照片。

非球面碳化硅反射镜基底的加工主要包括反射镜基底的粗磨、精磨和抛光几个阶段, 在不同的加工阶段使用不同粒度的金刚石微粉配制的抛光液, 研磨阶段和抛光阶段分别采用轮廓检测法和零位补偿干涉检测法对其面形精度进行检测。经过一段时间的抛光, 当非球面碳化硅反射镜基底的的面形精度达到 PV 值  $1\lambda$  左右 ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ) 时, 即可对其进行表面改性。图 5 是这块非球面

反射镜基底(改性前)的最终面形精度的检测结果,PV 值  $1.1\lambda$ ,RMS 接近  $\lambda/10$ 。



图 4 SiC 非球面反射镜基底的加工实物照片  
Fig. 4 Fabrication of SiC aspheric mirror

平摆动运动方式,压力为 0.2 MPa,偏心距为 8 mm,抛光轴最高转速为 200 r/min。经过半个多月的加工,采用零位补偿干涉检测法对非球面碳化硅反射镜面形进行检测,得到图 6 所示的最终抛光结果。

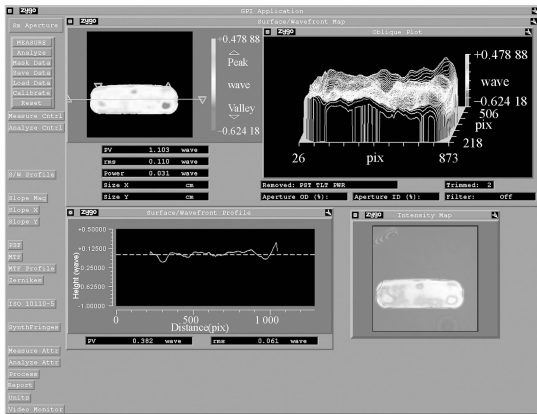


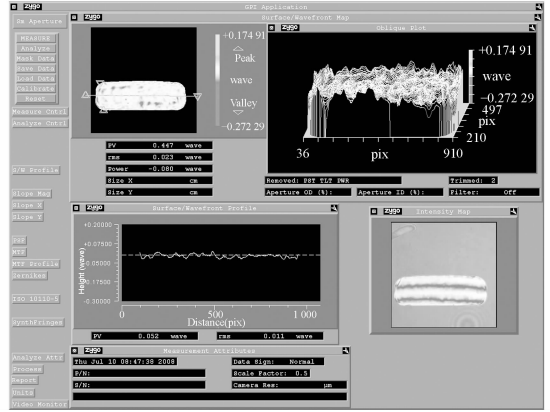
图 5 SiC 非球面反射镜基底的面形检测结果  
Fig. 5 Test result of SiC aspheric mirror

### 3.2.2 表面改性非球面碳化硅反射镜的加工

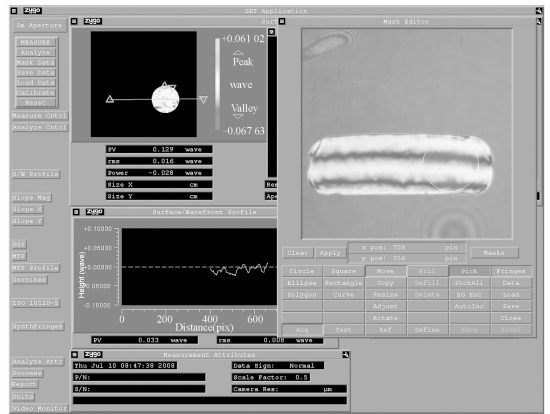
完成对碳化硅反射镜基底的加工后,采用离子束辅助沉积(IBAD)改性技术在碳化硅表面镀一层硅,然后再对这个改性层进行精密抛光。

通过前面采用各种抛光液对表面改性碳化硅样片的抛光试验可知,CeO<sub>2</sub> 抛光液和 SiO<sub>2</sub> 抛光液比较适合用于 IBAD-Si 碳化硅样片的抛光。试验发现,在改性层抛光的初始阶段由于改性层比较粗糙,粒度较大的 CeO<sub>2</sub> 抛光液更适合;而精密抛光阶段,为了得到硅改性层的更好的表面粗糙度,纳米级 SiO<sub>2</sub> 抛光液更为适合。

在对上述工艺方法研究的基础上,应用 FS-GJ-2 非球面数控加工中心对表面镀硅非球面碳化硅反射镜进行了抛光。具体加工条件如下:实验室温度为  $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ,抛光头直径为 50~80 mm 多种尺寸,抛光模采用半号沥青,抛光头采用



(a) 改性非球面碳化硅反射镜全口径的最终加工结果  
(a) Test result of whole aperture of surface modification aspheric SiC mirror after polishing



(b) 改性非球面碳化硅反射镜实际使用口径的加工结果  
(b) Test result of sub-aperture of surface modification aspheric SiC mirror after polishing

图 6 抛光后表面改性非球面碳化硅反射镜的加工结果  
Fig. 6 Test results of surface modification aspheric SiC mirror after polishing

图 6(a)是改性的非球面碳化硅反射镜经过抛光后整个镜面面形的最终检测结果,其面形精度(RMS 值)为  $0.023\lambda$ ( $\lambda=0.6328\mu\text{m}$ ),优于  $\lambda/40$ 。图 6(b)是反射镜实际使用的子口径的面形精度,子口径的面形精度为  $0.016\lambda$ (RMS 值),达到设计提出的面形精度  $\lambda/50$  的技术指标。同时使用

WYKO 表面粗糙度测量仪对经过抛光的改性碳化硅样片进行测量,测得其表面粗糙度为  $0.85 \text{ nm}(Rq \text{ 值})$ ,如图 3(c)所示,优于设计指标  $1 \text{ nm}(Rq \text{ 值})$ 。



图 7 表面改性非球面碳化硅反射镜抛光后的实物照片  
Fig. 7 Photo of surface modification aspheric SiC mirror after polishing

图 7 为加工完毕后具有高质量光学表面的

改性非球面碳化硅反射镜的实物照片。目前该反射镜已经交付用户,得到了用户的好评。

## 4 结 论

碳化硅材料具有比刚度高、热变形系数小、导热性能良好等综合特性,适合用于制作空间反射镜。采用离子束辅助沉积 (IBAD) Si 的方法对碳化硅表面进行改性,经过适当的加工,可获得高质量的光学表面。使用各种抛光液对碳化硅表面的硅改性层进行抛光试验,结果表明,微米级氧化铈抛光液的抛光效率较高,使用纳米级二氧化硅抛光液抛光后的样片表面质量最好。利用 CCOS 技术对尺寸为  $650 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  的表面改性的离轴非球面碳化硅 (SiC) 反射镜进行加工,最后检测结果表明,反射镜整个镜面的面形精度为  $0.023\lambda (\lambda = 0.6328 \mu\text{m})$ ,实际应用的子口径面形精度优于  $\lambda/50$  (RMS 值),表面粗糙度优于  $1 \text{ nm}$  ( $Rq$  值),达到设计提出的技术指标。

## 参考文献:

- [1] EALEY M A, WEAVER G Q. Development history and trends for reaction bonded silicon carbide mirrors[J]. *SPIE*, 1996, 2856: 66-72.
- [2] 马文礼, 沈忙作. 碳化硅轻型反射镜技术[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(2): 8-12.  
MA W L, SHEN M Z. Weightlight SiC mirror technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(2): 8-12. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 张舸, 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 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)
- [5] 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.
- [6] TANG H D, HUANG ZH R, TAN SH H. PVD SiC and PVD Si coatings on RB SiC for surface modification[J]. *SPIE*, 2006, 6149: 61490A.
- [7] JOHNSON S. SiC Coatings on RB SiC mirrors for ultra-smooth surfaces[J]. *SPIE*, 1993, 2018: 237-247.
- [8] 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)

作者简介: 张 峰 (1969—), 男, 吉林人, 博士, 研究员, 主要从事光学加工与检测方面的研究。E-mail: zhangfjy@yahoo.com.cn

徐领娣 (1980—), 女, 河北保定人, 博士研究生, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: xuldi@126.com

范 镛 (1976—), 男, 吉林蛟河人, 博士, 副研究员, 主要从事先进光学制造技术的研究。E-mail: fandi\_2000@hotmail.com

高劲松 (1968—), 男, 吉林白城人, 博士, 研究员, 主要从事光学镀膜方面的研究。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

张学军 (1968—), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: zxxj@ciomp.ac.cn