

文章编号 1004-924X(2011) 08-1750-07

RB-SiC 反射镜的材料制备、表面改性及非球面加工

闫 勇*, 金 光

(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: 针对 RB-SiC 反射镜工程实践中暴露的一些问题, 对 RB-SiC 反射镜的材料制备、表面改性及非球面加工等技术进行了研究。首先, 依据其改性特殊性, 选取了与 RB-SiC 反射镜材料热胀系数匹配的新型支撑材料进行热匹配设计。接着, 依据实际工程情况对非球面加工工艺及流程进行技术改进, 以提高加工的可靠性。最后, 采用试验的方法对 RB-SiC 反射镜的相关加工方法进行了试验验证。试验结果表明, 改性后 RB-SiC 反射镜完好, 改性前后镜面面形精度 RMS 值变化量仅为 0.017 ($= 623.8 \text{ nm}$), 变化率为 13%, 非球面加工周期缩短了 1~2 月。该技术确保了 RB-SiC 反射镜 10 m 的改性膜层在后续加工中的加工余量, 使其不易被磨漏, 提高了加工的安全性, 缩短了非球面加工周期, 该技术亦适用于其它 SiC 反射镜的制备及非球面加工。

关 键 词: RB-SiC 反射镜; 表面改性; 非球面加工; 加工周期

中图分类号: V475.3; TQ171.68 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111908.1750

Material preparation, surface modification and aspheric processing of RB-SiC mirrors

YAN Yong*, JIN Guang

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

* Corresponding author, E-mail: cclyy911@163.com

Abstract: To solve the problems of RB-SiC mirrors in engineering applications, the material preparation, surface modification and aspheric processing of RB-SiC mirrors were analyzed. Firstly, according to the special modification characteristics of the RB-SiC mirrors, a new material whose thermal expansion coefficient was matched well with that of the RB-SiC was chosen to be a new support for the thermal design. Then, the modification and fabrication technologies of RB-SiC mirrors were improved based on the actual situation of the aspheric processing for better processing reliability and shorter processing cycle. Finally, the improvement were verified by experiments. The experimental results indicate that the modified RB-SiC mirror is in a good condition. The RMSs of the mirror surfaces before and after modifications have changed only 0.017 ($= 623.8 \text{ nm}$, change rate in 13%), and the aspheric processing time has decreased 1 month or 2 months. The adequate margin of the 10 m modified layer in the subsequent processing is ensured, the processing security is improved and the process-

收稿日期: 2011-01-27; 修订日期: 2011-02-27.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z113)

ing cycle of the aspheric is shortened due to the new technology, which can been applied to the preparation and processing of other aspheric SiC mirrors as well.

Key words: RB-SiC mirror; surface modification; aspheric processing; processing cycle

1 引 言

随着空间光学有效载荷轻小型的深化和高分辨成像性能的不断提高,光学系统中主要光学元件的口径不断增大,从而使空间光学有效载荷轻小型化和高分辨成像性能之间的矛盾加剧。为此,对大口径空间光学有效载荷的主反射镜轻量化技术的研究更加活跃而宽泛。

目前,空间光学系统多采用轻量化效果最好的全反射式系统,同时多选择密度低、适宜轻量化加工的材料。与其它常用反射镜材料相比,SiC 具有较小的密度和较高的弹性模量,即其比刚度较高,可在实现同等机械性能的情况下最大限度地进行轻量化;另外,SiC 材料还具有较低的热膨胀系数和较高的导热系数,即其热稳定系数较高,故可降低对热控系统的要求,减少热控系统的质量和功耗;该材料同时还具有良好的光学加工特性,可做到净尺寸成型;当然,它还具有抗辐照性能佳、无毒等众多优点。目前,SiC 材料凭借其在物理特性、热特性、机械特性等方面的综合优势,已经替代玻璃和金属成为新一代空间反射镜坯体优选材料^[1-3]。

本文从工程实际出发,着眼于解决目前碳化硅反射镜应用中出现的问题,尝试并探索了新型 RB-SiC 反射镜非球面加工的一种新的技术方法,

并进行了相关的试验验证。试验数据表明,该方法有效保证了 RB-SiC 改性膜层的加工安全性,避免了后续加工的风险,并通过适当调整反射镜非球面加工的工艺顺序,使 RB-SiC 反射镜制备及非球面加工周期缩短了 1~2 月,这对研制任务周期要求极为严格的航天领域来说,意义重大。

2 RB-SiC 属性及现状

目前,空间用 SiC 反射镜镜坯的制备工艺主要有反应烧结 SiC(RB-SiC)、热压烧结 SiC (HP-SiC)、常压烧 SiC(SSiC) 和化学气相沉积 SiC (CVD-SiC) 4 种。

热压烧结 SiC 无法制成复杂形状镜坯,其在轻量化反射镜方面的应用有限;常压烧结 SiC 制作工艺复杂,材料收缩率达 10%~20%,其应用也极为有限;化学气相沉积 SiC 同样由于制备速度缓慢,无法用于制备复杂轻量化结构的镜坯,其一般应用在 Si 镜体的表面改性上。反应烧结碳化硅可通过浇注成型的方法,制备出致密、形状复杂的 SiC 镜坯,其结构收缩率仅为 1%~2%,是一种净尺寸成型工艺,极大地减少了后续机械加工的成本及加工周期,具有成本低、制备周期短的优点,是目前制备大口径复杂轻量化镜坯的优选材料,表 1 所示为 RB-SiC 材料与空间常用反射镜材料物理属性。

表 1 RB-SiC 与空间常用反射镜材料属性
Tab.1 Properties of RB-SiC and traditional mirror materials

材料名称	密度	杨氏模量	泊松比	热膨胀系数	导热率	比刚度	热稳定系数
	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	E/GPa	ν	$\alpha/(10^{-6}/K)$	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$E/(\rho \cdot GPa \cdot cm^3 \cdot g^{-1})$	$\alpha/(K)/(W \cdot m^{-1})$
Be	1.85	287	0.25	11.3	216	155.1	19.11
Al	2.70	68	0.33	22.5	167	25.2	7.42
ULE	2.21	67	0.24	0.015	1.3	30.3	86.67
Zerodur	2.53	92	0.24	-0.09	1.6	36.4	17.78
RB-SiC	3.04	330	0.25	2.4	170	108.6	70.83

20 世纪 70 年代末,美国、德国、俄国、日本、法国等先进国家都把 SiC 反射镜列为国家重点发展技术,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,并竞相将该技术应用到了航空航天领域,特别是近 10 年来, JWST 望远镜、0.5mGEO 望远镜、HIRDLs、SOFIA、ALADN、Herschel、ASTRO-F 天文望远镜、SPICA 红外天文望远镜等美国、欧洲、日本空间项目大量地采用了 SiC 反射镜技术。

在国内,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(中科院长春光机所)、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。其中,中科院长春光机所主要致力于 RB-SiC 应用技术的研制与开发工作,制备方式类似于美国的 CERAFORM 成型技术,目前已在尺寸复杂形状 RB-SiC 素坯成型、干燥、渗碳、反应烧结和 RB-SiC 反射镜非球面加工等方面取得了较大的进展,积累了丰富的经验,制备出了适宜工程应用的空间大口径 RB-SiC 反射镜并已应用于相关项目的工程研制中。

3 RB-SiC 材料的制备及特点

中科院长春光机所采用类似于美国的 CERAFORM 成型技术,使用一种先进的消失模技术结合凝胶注模成型工艺,制备出近乎完全致密的碳化硅镜坯,该碳化硅晶粒结构为 β -SiC 面心立方结构,是低温稳定的晶型,具体结构如图 1 所示。

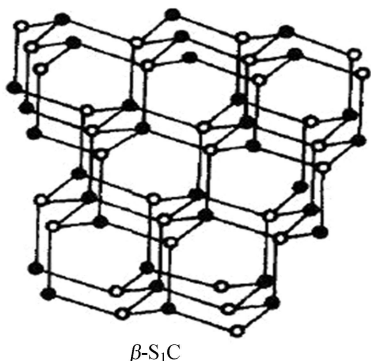


图 1 RB-SiC 晶粒结构

Fig. 1 Grain structure of RB-SiC

RB-SiC 镜坯的制备工艺为:按照一定颗粒级配将各种尺寸的碳化硅微粉分散到由单体、交联剂和分散剂等配制的预混液中,使之形成均匀的 SiC 浆料;在去除气泡后的 SiC 浆料中加入适量催化剂和引发剂,快速均化后立即注模,放置一段时间使浆料凝胶;经过脱模、干燥并排除坯体中的少量有机物后即可得到 SiC 镜体素坯;将由碳或是碳与碳化硅混合制备的镜体素坯与硅放置在高温真空烧结炉中升温至在 1420 以上,熔融硅在毛细管力的作用下进入到镜体素坯中,素坯中具有反应活性的碳与熔融硅反应生成新的 β -SiC,多余的硅填充坯体的空隙处,最终形成近乎 100% 致密的 SiC 镜体,反应烧结碳化硅陶瓷通常含有 10%~30% 的游离硅。

采用反应烧结工艺可以制备形状复杂、轻量化程度高的大尺寸镜体,而且由于 C 与 Si 反应时有一定的体积膨胀,抵消了烧结过程中素坯的收缩,因此 RB-SiC 的烧结收缩率非常小,仅为 1%~2%,在制备尺寸较大的反射镜镜体时,能够做到净尺寸成型,从而保证了镜体的尺寸精度,减少了后续加工量。图 2 所示为依据该工艺制备的 620mm 口径 RB-SiC 镜体,图 3 所示为 RB-SiC 镜坯制备工艺流程图。

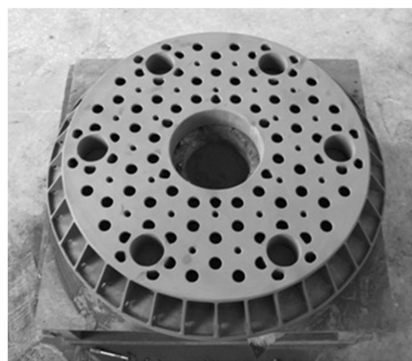


图 2 620 mm RB-SiC 镜体

Fig. 2 620 mm RB-SiC mirror blank

RB-SiC 镜体的反应烧结过程中,一部分熔融硅与素坯毛细孔中的碳反应生成新的碳化硅,另一部分多余的熔融硅冷却固化后填充素坯中的空隙,使最终烧结体结构完全致密。该过程主要涉及到烧结温度、烧结气氛、升降温速率和保温时间等一系列影响因素,因此只有制定合理的工艺才能保证反应烧结的顺利进行^[4-8]。

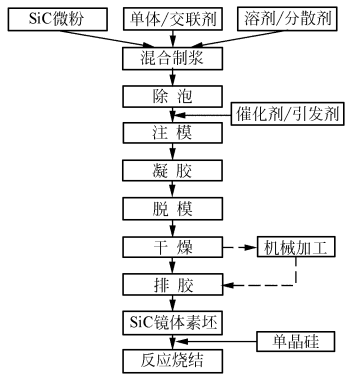


图 3 RB-SiC 镜坯制备工艺流程图

Fig. 3 Preparation flow chart of RB-SiC mirror blank

4 表面改性及非球面加工

由于制备工艺的原因, RB-SiC 材料中包含了 SiC 和 Si 两相成分, 而 SiC 和 Si 两相物理特性的差异导致在抛光过程中两相成分的去除效率不同, 从而导致实际加工过程中在两相成分交界处形成台阶。图 4 所示为直接抛光后的 RB-SiC 基底表面 500 光学显微镜照片, 直接抛光后的 RB-SiC 基底表面粗糙度 RMS 在 2.0 nm 左右, 根据总积分散射理论, 粗糙表面的总积分散射 (TIS) 与其表面粗糙度 密切相关, 随着 的增加, TIS 急剧上升, 变化十分灵敏。相关测试数据表明, 直接抛光后的 RB-SiC 基底表面散射系数达 10%, 这将产生系统杂散光, 导致基底镜面反射率降低, 影响整个光学系统的成像质量, 而这在高质量空间光学系统中是不允许的。为满足空间应用要求, 必须对 RB-SiC 基底表面进行改性, 通过在 RB-SiC 基底表面镀制一层与基底结合牢固、抛光性能良好且具有一定厚度的致密膜层覆盖住基底表面缺陷, 再对该致密改性层进行光学精密抛光, 以获得较高质量的光学表面^[9]。

目前, 长春光机所针对 RB-SiC 基底两相性的特点, 已成功采用物理气相沉积法制备了硅改性层 (PVD Si) 对 RB-SiC 进行了表面改性, 图 5 所示为 RB-SiC 基底改性后膜层结构示意图, 其改性抛光后的 RB-SiC 基底的反射率非常接近抛光良好的微晶玻璃的水平, 完全满足高质量空间光学系统使用要求^[10]。

非球面碳化硅 (RB-SiC) 反射镜的加工主要分为改性前非球面碳化硅 (RB-SiC) 反射镜基底

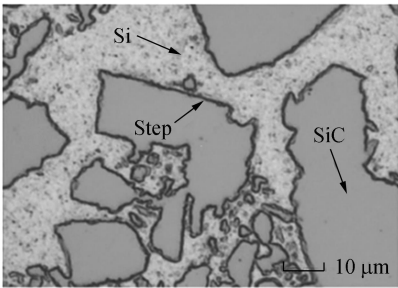


图 4 RB-SiC 基底表面

Fig. 4 RB-SiC substrate

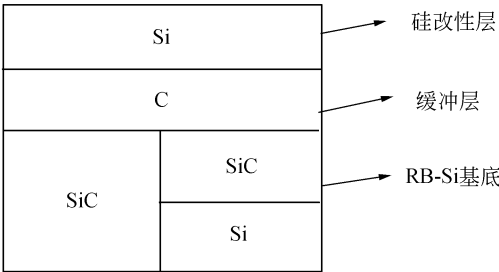


图 5 RB-SiC 基底改性后膜层结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of RB-SiC surface modification

的加工和改性后反射镜表面改性层的加工。非球面碳化硅反射镜基底的加工主要包括了反射镜基底的粗磨、精磨和抛光 3 个阶段, 在不同的加工阶段采用不同粒度的金刚石微粉配制的抛光液加工, 研磨阶段和抛光阶段则分别采用机械检测法和零位补偿干涉检测法对其面形精度进行检测。经过一段时间抛光, 当非球面碳化硅反射镜基底面形精度 RMS 值达到 /10(= 623.8 nm) 左右时, 即可采用物理气相沉积制备 Si 改性层 (PVD Si) 的改性技术在碳化硅 (RB-SiC) 反射镜表面镀一定厚度的改性膜层, 然后再依据相关加工指标对这个改性层进行精密抛光加工^[11-12]。

目前碳化硅 (RB-SiC) 反射镜制备及非球面加工的工艺流程如图 6 所示。

上述工艺流程在实践中也不断地暴露出一些工程问题, 具体概括如下:

- (1) 碳化硅反射镜制备及非球面加工周期长, 一般为 10~12 个月;
- (2) 碳化硅反射镜非球面改性层在后续加工过程中极易磨漏, 一般改性层厚度为 10 μm 左右, 从而造成改性和加工的反复, 严重影响加工进度;

(3) 碳化硅反射镜机械支撑件粘接过程中产生的粘接应力降低了改性后非球面面形精度, 严

重时会导致镜面出现突变, 大大影响到后续加工进度和加工精度。



图 6 碳化硅制备及非球面加工工艺流程图

Fig. 6 Preparation and processing flow chart of RB-SiC

5 技术改进

目前, 较为流行的 SiC 基底表面改性方法主要有化学气相沉积制备 SiC 改性层(CVD SiC)和物理气相沉积制备 Si 改性层(PVD Si)两种方法。与 CVD SiC 改性法相比 PVD Si 改性法制备温度相对较低(200 °C), 可控制在工程应用的要求范围内, 且其改性层 Si 的硬度相对较低, 更容易抛光, 达到相同抛光精度所需时间更短。另外, 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佳选择方案。

本课题组基于 RB-SiC 反射镜基底改性的特点, 按照热匹配的原则, 对碳化硅(RB-SiC)反射镜非球面加工的工艺及技术做了适当的改进, 以

期进一步完善并加快碳化硅(RB-SiC)反射镜的工程化研制进程, 具体措施如下:

(1) 镜体机械支撑件选择合适的线胀系数。按照热匹配原则, 与 RB-SiC 反射镜直接接触的机械支撑件选取线膨胀系数可调的低膨胀合金材料(4J36)与 RB-SiC 反射镜材料进行 $-30 \sim +200$ °C 的热匹配设计, 使其适应 PVD Si 改性时的温度变化, 避免热应力的产生, 防止 RB-SiC 反射镜与其机械支撑件因线胀系数的不同而导致镜体破裂;

(2) 更改并调换工艺流程顺序。在 RB-SiC 反射镜非球面基底加工前即完成其机械支撑件的粘接和装配工作, 避免改性后支撑件粘接和装配工作对镜面面形的影响, 保证了改性膜层(10 μm 厚)的加工安全性, 避免了后续改性和加工的反复, 修改后的碳化硅(RB-SiC)反射镜制备及非球面加工的工艺流程如图 7 所示。

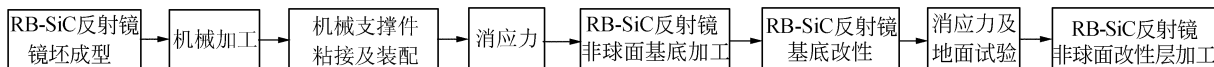


图 7 修改后的碳化硅制备及非球面加工工艺流程图

Fig. 7 Preparation and processing flow chart of RB-SiC after modifying

6 试验及数据

在上述技术改进的基础之上, 对 620 mm 口径 RB-SiC 反射镜的非球面加工进行了试验验证。首先, 依据该 RB-SiC 反射镜在 $-30 \sim +200$ °C 实测的线胀曲线选配了与其线胀匹配的

低膨胀合金材料(4J36)以取代原有材料; 其次, 在 RB-SiC 反射镜机械加工完成后即将其机械支撑件与 RB-SiC 反射镜粘接并完成装调及消应力工作; 最后再按其相应非球面指标进行了 RB-SiC 反射镜非球面的加工、改性及精磨工作, 并取得了预期的效果^[13-14]。

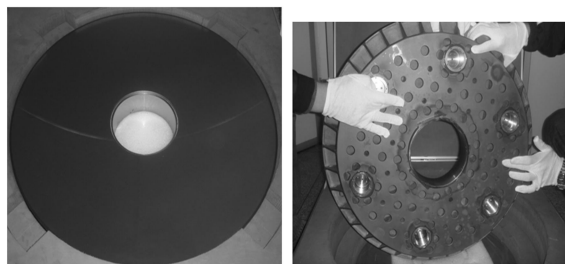
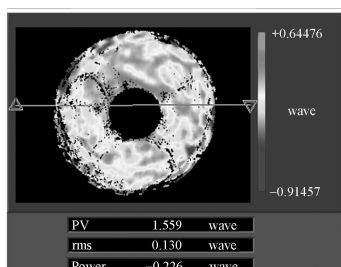


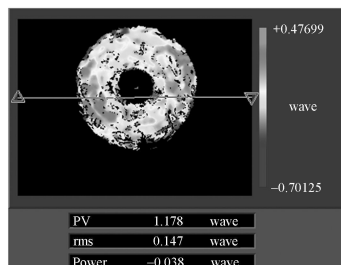
图 8 620 mm RB-SiC 反射镜改性后的实际状态

Fig. 8 Actual states of modified 620 mm RB-SiC



(a) 改性前

(a) Before modification



(b) 改性后

(b) After modification

9 620 mm RB-SiC 反射镜改性前后镜面面形干涉图

Fig. 9 Interferograms of 620 mm RB-SiC mirror before and after surface modifications

该项工作的难点主要有两点: 一是要求 RB-SiC 反射镜在改性过程中保持镜体的完整性; 二是要求 RB-SiC 反射镜在改性前后其镜面面形保持不变, 即镜面面形精度 RMS 值为 $\lambda/10$ ($\lambda = 623.8 \text{ nm}$) 左右, 这是保证 10 m 改性层不被磨漏并顺利实施后续加工的重要保障条件。图 8 所示为该 620 mm 口径 RB-SiC 反射镜在 ZZS2500-1/G 型镀膜机上完成改性后实际状态, 图 9 所示为 MetroPro Zygo 干涉仪采集的镜面改性前后干涉图, 从改性前后数据对比知, 镜面面形精度 RMS 值变化量仅为 0.017 ($\lambda = 623.8 \text{ nm}$), 变化率为 13%, 完全满足下一步非球面加工要求。目前该 620 mm 口径 RB-SiC 反射镜已顺利转入最后的非球面精磨阶段。

7 结 论

本文从工程实际角度出发, 着眼于解决目前碳化硅反射镜工程应用中出现的问题, 尝试并探索了新型 RB-SiC 反射镜非球面加工的一种新的技术方法。对 620 mm 口径 RB-SiC 反射镜进行了相关试验, 得到的数据表明, 该反射镜面形精度由改性前的 0.13 变为 0.147, 变化量仅为 0.017, 该量级保证了其改性膜层的加工安全性, 避免了后续加工的风险; 同时, 适当工艺顺序的调整在保证反射镜非球面加工精度的同时, 使 RB-SiC 反射镜制备及非球面加工周期缩短了 1~2 月, 这在研制任务周期要求极为严格的航天领域来说意义重大, 该技术同样适用于其它 SiC 反射镜的制备及非球面加工。

参考文献:

- [1] 鲍赫, 李志来. 长条型 SiC 反射镜轻量化及支撑结构的设计[J]. 光学技术, 2008, 34(4): 593-596.
BAO H, LI Z L. Design of the strip SiC mirror supporting structure and lightweight [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(4): 593-596. (in Chinese)
- [2] 王富国, 杨洪波, 赵文兴. 1.2 m SiC 主镜轻量化设计与分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 85-91.
WANG F G, YANG H B, ZHAO W X. Lightweight design and analysis of a 1.2 m SiC primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 85-

91. (in Chinese)

- [3] 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]. *Optical Technique*, 2007, 33(4): 510-518. (in Chinese)
- [4] 闫勇. 空间高分辨轻型相机主反射镜结构热设计研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2009.
YAN Y. Study on primary mirror sub-assembly

- lightweight mechanical/thermal design of high resolution space lightweight camera* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
- [5] 闫勇, 贾继强, 金光. 新型轻质大口径空间反射镜支撑设计[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(8): 1533-1539. YAN Y, JIA J Q, JIN G. Design of new type spaceborne light weighted primary mirror support [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1533-1539. (in Chinese)
- [6] 赵文兴, 张舸, 闫勇. 高分辨轻型光学相机 SiC 反射镜工艺攻关报告[R]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2008. ZHAO W X, ZHANG G, YAN Y. *SiC mirror of high-resolution optical camera technology research report* [R]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [7] 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 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)
- [8] 张舸, 赵汝成, 赵文兴. 大尺寸轻型碳化硅质反射镜素坯的凝胶注模成型[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增): 678-681. ZHANG G, ZHAO R C, ZHAO W X. Gel-casting of large-scale lightweight SiC mirror blank [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(supp.): 678-681. (in Chinese)
- [9] 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 quo of SiC space mirror material and its surface modification [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2): 71-78. (in Chinese)
- [10] 申振峰, 高劲松, 王笑夷, 等. RB-SiC 基底反射镜表面改性工艺的改进[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(5): 969-974. SHEN ZH F, GAO J S, WANG X Y, *et al.*. Improvement of technological process for surface modification of RB-SiC mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 969-974. (in Chinese)
- [11] 张峰, 徐领娣, 范镛, 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)
- [12] 张峰, 范镛, 李锐刚, 等. 非球面碳化硅反射镜的加工与检测[J]. 应用光学, 2008, 29(6): 1004-1008. ZHANG F, FAN D, LI R G, *et al.*. Fabrication and testing of aspheric silicon carbide mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(6): 1004-1008. (in Chinese)
- [13] 闫勇, 王栋, 金光. 大口径 SiC 反射镜组件研制技术[J]. 光电工程, 2010, 37(6): 108-112. YAN Y, WANG D, JIN G. Design and fabrication technology of large aperture SiC mirror assembly [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(6): 108-112. (in Chinese)
- [14] 闫勇, 金光, 杨洪波. 空间反射镜结构轻量化设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 37(1): 97-101. YAN Y, JIN G, YANG H B. Lightweight Structural design of space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 37(1): 97-101. (in Chinese)

作者简介:



闫勇(1981-), 男, 山西吕梁人, 博士, 助理研究员, 2004 年于吉林大学获学士学位, 2009 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位, 主要从事空间光学传感器光机结构一体化的研究。E-mail: cclyy911@163.com



金光(1958-), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士生导师, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所新技术室主任, 主要从事空间遥感器总体设计的研究。E-mail: jing@ciomp.ac.cn