

文章编号 1004-924X(2007)08-1170-05

空间相机反射镜碳化硅材料性能测试

高明辉, 刘磊, 任建岳

(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:通过对 SiC 样件加工研磨及反射率等性质的测试,得到了材料的性能数据,分析了用 SiC 材料制备反射镜毛坯的几种方法的优缺点。采用 Lanmda-9 分光光度计,对 SiC 在不同表面镀硅、镀银、以及镀硅后再镀银的条件下进行了反射率测试,得出在镀硅再镀银条件下,反射率最高,达到 98%的结果。利用 Wyko 干涉仪对国产 SiC 长条形样镜进行研磨分析测试,测得表面粗糙度值为 6.27 nm。该材料在某型号离轴三反光学系统中作为反射镜得以应用和验证,测得被加工后,镜面面形 PV 值达到 0.068λ , RMS 值为 0.01λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)。此结果表明,材料的性能达到了可加工可应用的要求。

关键词:空间相机;反射镜;反射率;碳化硅;表面粗糙度

中图分类号:V447.3;TH703;V254 **文献标识码:**A

Characteristic test of SiC for space camera's mirror

GAO Ming-hui, LIU Lei, REN Jian-yue

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

Abstract: The performance data of SiC materials were obtained by processing and polishing SiC and testing its reflectivity, and the advantages and disadvantages of some fabrication methods of SiC mirror roughcast were analyzed. The reflectivity of SiC specimen was tested under different conditions of surface processing including Si-coated or Ag-coated surfaces and Ag-recoated on Si-coated surface with Lanmda-9 Spectrophotometer. The highest reflectivity is 98% under the condition of recoated Ag on coated-Si surface. Domestic long strip SiC mirror was polished and tested. The result shows that the surface roughness is 6.27 nm with Wyko interferometer. As a reflection mirror of off-axis three reflect optics system, the material performance was validated in a mirror surface figure with PV value of 0.068λ , and RMS of 0.01λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$), the results indicate that performance of SiC can meet the requiremerits of the space camera's mirror.

Key words: space camera; mirror; reflectivity; silicon carbide (SiC); surface roughness

收稿日期:2007-05-22;修订日期:2007-07-18.

基金项目:国家 863 高技术计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

1 引言

光学系统是航天飞行器重要的组成部分,反射镜是大型太空望远镜、探测卫星、气象卫星、侦察卫星、高分辨率相机等系统的重要组成部分,合格的反射镜应该对某一波段电磁波的反射率高,同时在温度变化状态下变形小,在具体使用条件下,能保证镜面形状和尺寸的稳定性^[1]。一般大型的空间相机系统采用反射式设计,反射镜采用的材料由早期的K9、微晶玻璃、金属铍等材料发展到近期主要采用SiC及铝基复合材料。由于制造设备和工艺的发展, SiC的性能不断发展,已经成为反射镜的首选材料。SiC密度小,硬度大,无毒,尤其是抗热冲击性极佳^[2]。对SiC材料研究较多的是美国和俄罗斯。美国德克萨斯州的Dallas光学系统公司、POCO石墨公司以及马萨诸塞州的SSG精密光电子器件公司在SiC的研究方面处于领先地位^[3],他们研制的SiC反射镜直径可达600 mm,曲率半径达3 m,抛光后光学面形误差的PV值 $< \lambda/2$ (315 nm),表面粗糙度的RMS值 < 10 nm,已广泛应用于航天、航空的光学系统、反射镜、扫描镜、结构和零部件等^[4]。国内开展这项研究比较早的是上海硅酸盐研究所,已经制造出直径500 mm的样品。长春光机所的研究比较晚,但发展很快,已经加工出轻量化的圆镜和长条镜,经过研磨抛光,表面粗糙度达到5 nm,能够满足下一步改性处理的要求,达到光学成像的使用要求。

2 SiC材料制作反射镜镜坯的方法

由于SiC材料性能优良,故在空间遥感器的光学系统反射镜中被广泛应用。但SiC来源不

同,有的是从国外进口的,有的是国内制造的,制作的方法也不同,对材料的应用和本身性能的影响也很大。目前主要采用以下方法制作反射镜镜坯^[6]:

2.1 热压烧结 SiC(HP-SiC)

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。它主要的局限性在于不能制成复杂形状的镜坯,而且制得的样品各向异性,线膨胀系数较大。因此,热压烧结SiC在轻型反射镜方面的应用很受限^[7]。

2.2 反应烧结 SiC(RB-SiC)

采用这种方法可以制备形状复杂,轻量化程度高的大尺寸镜坯,而且收缩率小,仅为1%~2%,因此是一种净近尺寸(Near Net Shape, NNS)成型工艺。但是反应烧结SiC中含有游离硅,因此材料的均匀性及光学加工性能较差。

2.3 Sintered SiC(SSiC)

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,但SSiC的制备工艺复杂,收缩率大,一般达到了10%~20%,而且所需设备十分昂贵,制约了SSiC制备技术的发展。

2.4 化学汽相沉积 SiC(CVD-SiC)

这种方法制备SiC沉积速率较慢,工艺时间比较长,不能制备出适合轻量化的复杂形状,因此一般将CVD-SiC应用在SiC镜体的表面改性上。

目前国内参与大尺寸轻型SiC反射镜研究的单位主要有:中国科学院上海硅酸盐研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和哈尔滨工业大学等。上海硅酸盐研究所制备的方法是热压烧结SiC,长春光机所与哈工大的制备方法是反应烧结SiC。

表1 不同工艺方法制备的SiC材料和C/SiC材料性能对比

Tab.1 Comparison of material properties between SiC and C/SiC in different craftwork fabrication ways

材料	密度 (g/cm ³)	热传导率 (W/m·K)	比热容 (J/kg·K)	弹性模量 (GPa)	热膨胀系数 (K ⁻¹ 10 ⁻⁶)	表面粗糙度 RMS(nm)
CVD SiC	3.21	300	710	490	4.5	≤3
RB SiC	3.1	120~170	—	391	4.3	≥20
HP SiC	3.2	50~120	—	451	4.6	≥50
Sintered SiC	3.1	15~120	—	408	4.5	≥100
C/SiC	2.0	125	700	270	2.0	≤20

表 1 是不同工艺制备的 SiC 材料及 C/SiC 材料性能的比较,可以看到,CVD SiC 的性能优于其它工艺制备的 SiC 材料,非常适合制作反射镜镜面;其它工艺制备的 SiC 光学性能相对较差,但力学性能及热稳定性都很好,可以用于制备反射镜坯体;C/SiC 材料由于密度轻、各向同性、可以实现减重,是今后的发展方向。

3 SiC 材料特性

选择反射镜镜体材料必须考虑的因素:

(1)高比刚度;

(2)尺寸稳定性:要求膨胀系数低,热传导率高,比热低,能经历 3~10 年的温度和应力循环;

(3)能经受其它环境影响:如吸湿、辐射影响等;

(4)镜体质量和总体成本低;

(5)加工性能:要求可抛光到所需的面形精度,反射性好(必要时镀膜)。

与其它常用玻璃和金属相比, SiC 具有一些优异属性,被认为是前景广阔的反射镜材料。SiC 的优良特性包括:比刚度极高,热传导率高,尺寸稳定性突出。表 2 对 SiC 和其它常用光学材料的属性进行了比较。

表 2 光学材料的室温性能参数对比

Tab. 2 Comparison of optical materials in property parameters in room temperature

材料	密度(ρ) (g/cm^{-3})	弹性模量(E) (GPa)	热膨胀系数(α) ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	热传导率(K) ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	比刚度(E/ρ)	热性能系数(K/α)
RB SiC	2.89	391	2.4	155	135	65
CVD SiC	3.21	466	2.2	280	145	127
HP SiC	3.20	455	2.0	130	142	65
石墨转化 SiC	2.93	232	2.0	170	91	85
铍	1.85	287	11.3	190	155	17
微晶玻璃(Zerodur)	2.53	91	-0.09	1.64	36	18
熔石英	2.1	72	0.5	1.5	34	3
碳纤维	1.55	130	0.2	5	84	25
ULE	2.2	67	0.03	1.3	30	43
铝	2.7	68	23.6	170	25	7

从表 2 可以看出, SiC 的热传导率比一些金属高,热传导率高允许温差快速消散,更快地达到等温化。其热膨胀系数低意味着经历突然且不均匀的温度变化时, SiC 反射镜不会有太大的变形。而 SiC 的低比热则使其温度改变需要较少的能量。以上几个因素使 SiC 反射镜的热稳定性是大多数传统材料反射镜的 100 多倍。微晶玻璃和 ULE 等玻璃陶瓷材料的热膨胀系数接近零,由这些材料制造的反射镜对热变形的抵抗可与 SiC 媲美,但这些材料的刚度仅约为 SiC 的 1/4,而且断裂韧度低,这使其对高性能的反射镜应用来说不太理想。

从 SiC 材料的性能看,硬度很高,硬度值达到 9,仅次于金刚石(硬度值 10)。通常的加工方法加工工艺相对复杂,比较困难。SiC 的材料切除

速度大约是熔石英的 1/35,是微晶玻璃的 1/50。另外,光学器件的轻量化程度太高时,容易产生与几何形状有关的面形误差(如绉缝),抛光时的机械载荷和应力松弛还会导致不易消除的面形误差。因此生产轻量化、超精抛的 SiC 基体很贵,得到精加工基体的交付时间可能是几个月。通过对国产碳化硅材料长条镜的研磨抛光,应用 Wyko 干涉仪,得出表面粗糙度值为 6.27 nm,表明能够满足改性和进一步加工的精度要求。在某型号项目的光学系统中应用该材料作为反射镜,进行了光学的加工和测试,测得 PV 值为 0.068 λ , RMS 值为 0.01 λ ($\lambda=632.8$ nm),说明国产的 SiC 材料的性能能够满足光学成像的要求。图 1 为研磨抛光的表面粗糙度检测图。图 2 为长条镜光学加工后在 Zygo 干涉仪检测下的面形图。

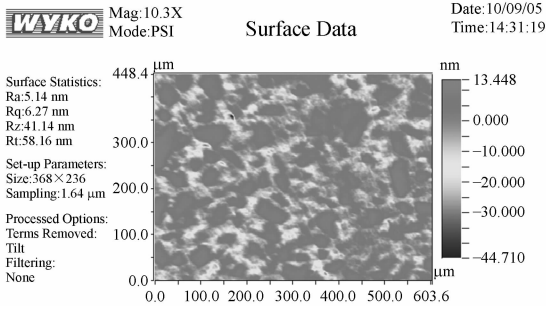


图 1 长条形 SiC 镜表面粗糙度检测结果

Fig. 1 Test graph of surface roughness of long strip SiC mirror

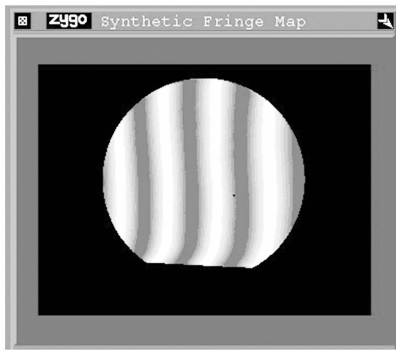
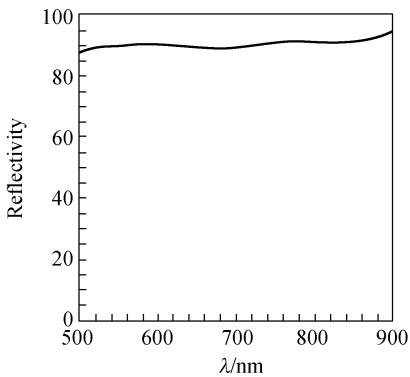


图 2 长条形 SiC 反射镜面形检测图

Fig. 2 Test graph of surface figure of long strip SiC mirror

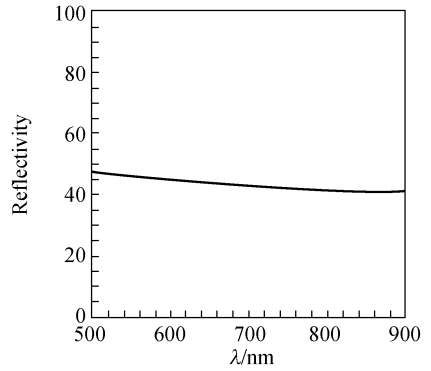
4 SiC 表面处理与反射率的关系图

在抛光 SiC 基体上,分别进行镀硅、镀银、或镀硅再镀银以及不做任何处理的四种不同方式处理,在各种情况下进行了表面反射率的测试。从测试结果可以看出 SiC 对光的吸收和反射的能力,



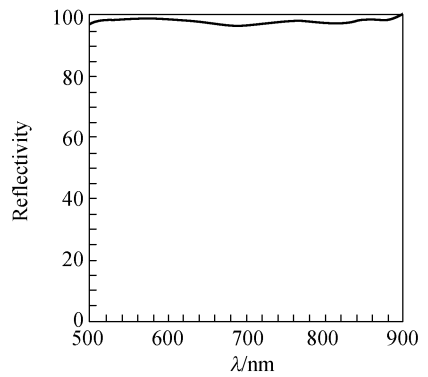
(a)SiC 镀 Ag 的反射率曲线图

(a) Reflectivity curve of Ag-coated SiC



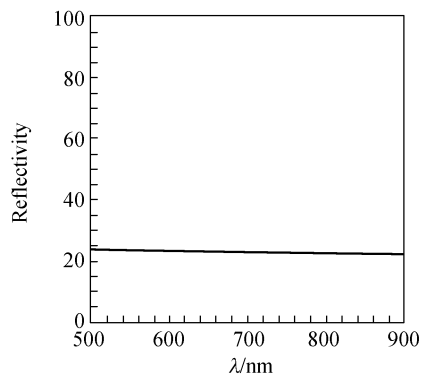
(b)SiC 镀 Si 的反射率曲线图

(b) Reflectivity curve of Si-coated SiC



(c)SiC 镀 Si 再镀 Ag 的反射率曲线图

(c) Reflectivity curve of recoated-Ag on Si-coated surface



(d)SiC 基体的反射率曲线图

(d) Reflectivity curve of SiC

图 3 SiC 的反射率曲线图

Fig. 3 Reflectivity curves of SiC

以及能否达到反射率的要求。测试曲线如图 3 所示。

从图 3 的(a)、(b)、(c)、(d)四条曲线可以看出,在 SiC 基体上镀硅再镀银的反射率是最高的,

也是在实际应用中采取的方法[图 3(c)]。而直接测得的 SiC 基体的反射率最低,说明它对光线的吸收很强[图 3(d)]。在 SiC 基体上镀硅的情况也是吸收强,反射率偏低[图 3(b)],而在 SiC 基体上镀银后,反射镜的镜面反射率能够达到 90%[图 3(a)]。

5 结 论

对 SiC 的加工性能和表面改性处理进行了测试研究,并对由 SiC 制作反射镜的几种工艺方法进行了介绍,阐述了各自的优缺点,以有利于工程应用。通过对 SiC 样件的加工研磨测试,表面粗糙度达到 5 nm,能够满足下一步光学表面改性处理的要求。对经过不同表面改性处理的 SiC 进

行测试,得出在 SiC 基体上镀硅再镀银的反射率是最高的,能达到 98%。而直接测得的 SiC 基体的反射率最低,说明它对光线的吸收很强。在 SiC 基体上镀硅也是吸收强,反射偏低。而在 SiC 基体上镀银的情况下,反射镜的镜面反射率能够达到 90%。在实际应用中进行光学加工和测试,测得 PV 值为 0.068λ , RMS 值为 0.01λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),说明国产的 SiC 材料的性能能够满足光学成像的要求。因此,从对材料性能测试可以看出, SiC 是理想的光学材料。但与 SiC 基体初步成形、轻量化和光学精加工相关的成本和交付时间是这种材料在光学系统中广泛应用的主要障碍。目前国内对制作到加工都在开展广泛的研究,尤其精加工,抛光的技术仍是研究的重点。

参考文献:

- [1] BRECKINRIDGE J B. Advanced applications; an overview[J]. *Critical Reviews of Optical Science and Technology*, 1997, CR67: 19-24.
- [2] 张舸, 赵文兴. 轻型反射镜镜体结构参数的分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1): 48-53.
ZHANG G, ZHAO W X. Analysis on structural parameters of light-weighted mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 48-53. (in Chinese)
- [3] 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. Lightweight SiC mirror technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(2): 8-12. (in Chinese)
- [4] 吴清文. 空间相机中主镜的轻量化技术及其应用[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(6): 69-81.
WU Q W. The lightweight and application of primary mirror on space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(6): 69-81. (in Chinese)
- [5] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
YNAG L. *Fabricate Techniques in Advanced Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [6] 高明辉. 空间相机反射镜结构形式及其支撑方案研究[R]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2006.
GAO M H. *The research of structure mode and support scheme about space camera mirror* [R]. ChangChun: ChangChun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2006. (in Chinese)
- [7] 张长瑞, 周新贵. 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. The development of lightweight optics made of SiC and SiC matrix composites[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(2): 14-19. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 牛海燕, 张学军. $\phi 124\text{ mm}$ 口径碳化硅质非球面镜面数控研抛技术研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 539-544.
NIU H Y, ZHANG X J. Research on computer controlled polishing technology of $\phi 124\text{ mm}$ aspheric reaction-burned silicon carbide Mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 539-544. (in Chinese)

作者简介: 高明辉(1971—), 男, 吉林榆树人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士后, 从事光学结构设计、分析、加工检测方面的研究。E-mail: ccgaomh@163.com