

文章编号: 1003-501X(2011)08-0145-06

新型 SiC 光学材料的制备及应用

闫 勇, 金 光, 张 雷, 王 栋, 姚劲松

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 随着空间成像技术的发展, 当今各科技大国均加大了对新型光学材料的制备及应用的研究工作。近年来新兴起的新型 SiC 材料因其良好的热稳定性、高比刚度、低密度、易于轻量化等优点, 而成为未来空间相机主光学成像元件的首选材料。本文结合当前国内外 SiC 材料研究进展, 介绍了新型 SiC 光学材料常用的几种制备技术及相关应用, 对其制备方法和加工工艺进行了系统的阐述和总结, 重点介绍了 SiC 材料与常规玻璃材料加工的不同之处, 并对比了国内外的加工情况及我国目前 SiC 材料加工现状。从当前新型 SiC 加工情况看, SiC 加工采用的数控光学加工技术 CCOS 大大提高了 SiC 材料的加工效率和加工精度, 具有广阔的应用前景。

关键词: 空间成像; SiC 光学材料; 制备及应用; 数控光学加工技术

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.08.024

Preparation and Application of the New SiC Optical Material

YAN Yong, JIN Guang, ZHANG Lei, WANG Dong, YAO Jing-song

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

Abstract: With the development of the space imaging, all of the countries have increased the research work about the preparation and application of the new optical material. Because of the good thermal stability, high specific stiffness, low density and being easy to light weight, the SiC material is becoming the preferred material for the main optical components of the space camera. The paper describes a new type of SiC optical material which is used in the optical system mirror. And the common preparation technologies and related applications of the SiC are introduced too. The SiC material's preparations and processing technologies are summarized seriously. The author focused on the differences of the SiC material and conventional glass processing, and compared the processing situation home and abroad. From the current situation of the SiC processing, the technology of Computer-controlled Optical Surfacing (CCOS) has enhanced the efficiency and precision of the SiC greatly, which has broad application prospects.

Key words: space imaging; SiC optical material; preparation and application; computer-controlled optical surfacing

0 引 言

随着空间成像技术的发展, 在高技术需求的牵引和市场竞争的驱动下, 世界各国的研究机构对大口径空间反射镜的研制投入了极大的热情, 成功研制出了红外天文卫星望远镜(IRAS)Φ62 cm 主镜、天文实验室望远镜(OAO-C)Φ81 cm 主镜、空间红外望远镜(SIRTF)Φ85 cm 主镜、哈勃空间望远镜(HST)Φ2.49 m 主镜及韦伯空间望远镜(JWST)Φ6.5 m 主镜等一些极具代表性的大型空间反射镜, 推动了大口径空间反射镜制备技术与轻量化技术的极大发展。从大口径反射镜轻量化实现的途径看, 选用新型性能优良的材料与加工工艺、选择有效的轻量化镜坯结构及采用新型的能动薄镜面结构是目前普遍采用的方法。

收稿日期: 2011-04-21; 收到修改稿日期: 2011-06-19

基金项目: 国家 863 高技术研究发展资助项目(2007AA12Z113)

作者简介: 闫勇(1981-), 男(汉族), 山西离石人。助理研究员, 博士, 主要研究工作是空间光学仪器一体化设计及分析。

E-mail: cclyy911@163.com。

为有效的减轻反射镜重量，并在较宽的温度范围内保持稳定的光学面形，寻求性能优良的高导热、高弹性模量与轻质的镜坯材料是大口径反射镜技术发展的方向之一。目前，除金属铍、熔石英、微晶玻璃等外，碳化硅材料因其良好的低热变形量、高弹性模量、良好的尺寸稳定性和光学加工性能而被越来越广泛地应用于大口径空间反射镜的制备之中^[1]。

1 SiC 材料特性

镜坯材料的选择主要考虑反射镜受力及受热后结构及镜面面形的稳定性。因此反射镜材料的选择主要参考以下两个物理量^[2-3]：

a) 材料比刚度 E/ρ ，即材料的弹性模量 E 与密度 ρ 之比。该值越大，单位载荷引起的结构变形越小。在同等条件下，材料的比刚度大，将会使结构的比刚度得到相应的提高。这种大比刚度的要求在空间应用中显得尤为重要。基体材料的刚度对反射镜镜面的加工以及光学元件装配等的适应性有明显影响，刚度越大的材料抵抗由于抛光、装配、重力和操作使用中的振动变形的能力越强。

b) 导温系数 K/α ，即材料的导热率 K 与热膨胀系数 α 之比，它与材料的热变形性成反比。导温系数越大，材料热惯性越小，光学元件受到外界热作用时，其热稳定性越好。

另外，作为空间用反射镜材料，还应该具有较高的轻量化程度、良好的机械加工和光学加工性能、能够获得需要的形状和表面粗糙度等。与此同时，材料的来源也是考虑的一个重要因素。

目前国内外常用铍(Be)、铝(Al)、融石英(ULE)、微晶玻璃(Zerodur)、硅(Si)及碳化硅(SiC)等作为镜坯材料，其材料属性如表 1 所示。由表 1 可以看出，碳化硅材料具有较高的弹性模量，适中的密度，较小的热膨胀系数，较好的导热系数和耐热冲击性，因此具有较高的比刚度和高度的尺寸稳定性等一系列优秀的物理品质，是空间反射镜制备的首选材料。

表 1 空间常用反射镜材料属性表
Table 1 The material properties of the common space mirror

Materials	Density $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	Young's modulus E/GPa	Poisson's ratio ν	Thermal expansion $\alpha/(10^{-6}/\text{K})$	Thermal conductivity $K/(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	Specific stiffness $E/\rho(\text{GPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g})$	Steady state distortion $\alpha/K(\mu\text{m}/\text{W})$
Be	1.85	287	0.25	11.3	216	155.1	0.05
Al	2.7	68	0.33	22.5	167	25.1	0.13
ULE	2.2	67	0.24	0.015	1.3	30.4	0.01
Zerodur	2.53	92	0.24	-0.09	1.6	36.4	-0.06
Si	2.33	131	0.42	2.6	137	56.2	0.02
SiC	3.05	400	0.25	2.5	185	131	0.01

除物理性质外，在加工工艺上，碳化硅材料也具有较较强的优势。从工艺上看，碳化硅质反射镜镜体可以采用类似普通陶瓷成型的注浆技术(如 Ceraform 技术)，较方便地制作大尺寸(1 000 mm 以上口径)、形状复杂的反射镜素坯，大大缩短反射镜的制备周期，并有效地降低加工成本；另外，碳化硅质反射镜镜体较大的轻量化率也是使其成为空间光学遥感器大口径反射镜材料的理想选择的主要因素之一^[4-5]。

图 1 为 SiC 陶瓷与其他反射镜材料的性能比较，图中横坐标是材料的比刚度，即材料弹性模量与密度之比，比值越大，则采用该材料制备的反射镜镜体的轻量化程度越高；图中纵坐标为材料的热稳定性，即材料导热率

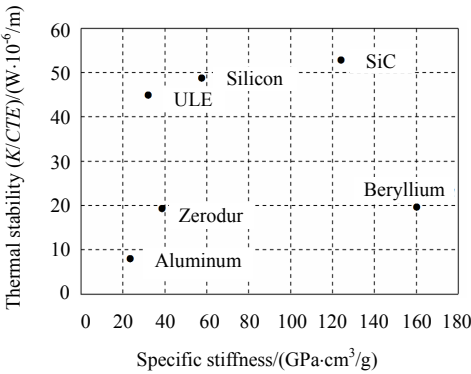


图 1 空间反射镜常用材料性能比较
Fig.1 The material properties compare of the space mirror

与热膨胀系数之比, 比值越大, 说明该材料抵抗热变形的能力越强。空间用轻型反射镜为了降低发射重量、保持镜面面形, 必须具备高度的轻量化和良好的热稳定性。也就是说性能处于图 1 右上角位置的材料, 适于制备空间用反射镜。从图中可以看到, 碳化硅陶瓷材料的比刚度和热稳定性都相对较高, 因此与其他传统材料相比, 是一种非常理想的空间遥感相机用反射镜基体材料。

2 材料的制备及应用^[6-9]

碳化硅陶瓷材料因制备工艺的不同可分为若干种, 常用于反射镜镜体的有热压烧结 SiC(HP-SiC)、反应烧结 SiC(RB-SiC)、常压烧结 SiC(Sintered SiC,SSiC)和化学汽相沉积 SiC(CVD-SiC)。

热压烧结 SiC 的制备过程是首先将微米级的碳化硅颗粒和助烧剂以及阻止晶粒过分长大的添加剂充分混合, 然后在一定的温度、压力和时间下烧结致密后得到坯体。

这种方法是制备高密度、性能优异的 SiC 陶瓷材料最有效的途径之一。热压烧结碳化硅陶瓷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。该工艺的主要局限性在于不能制成复杂形状的镜坯, 而且制备的坯体尺寸较小, 因此限制了热压烧结 SiC 陶瓷在大尺寸轻型反射镜方面的应用。

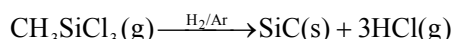
反应烧结工艺能够制备出近乎完全致密的碳化硅陶瓷。RB-SiC 陶瓷的制备工艺为: 将由碳或是碳与碳化硅混合制备的陶瓷素坯, 与硅放置在高温真空烧结炉中, 在 1 420℃以上, 熔融硅在毛细管力的作用下进入到陶瓷素坯中, 素坯中具有反应活性的碳与熔融硅反应生成新的 β -SiC, 多余的硅填充坯体的空隙处, 最终形成近乎 100%致密的 SiC 镜体。反应烧结碳化硅陶瓷通常含有 10%~30%的游离硅。

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。在制备尺寸较大的反射镜镜体时, 能够减小 RB-SiC 陶瓷烧结过程中的形变, 从而保证镜体的尺寸精度。

常压烧结工艺是把纯度较高的 SiC 微粉和粘结剂、助烧剂等均匀混合, 利用冷等净压成型素坯, 然后将素坯加工成所需要的各种形状, 最终在 2 000℃左右的高温下烧结, 得到致密的 SiC 陶瓷坯体。

常压烧结工艺是目前制备大尺寸轻型碳化硅质反射镜镜坯最有效的方法之一, 但工艺过程复杂, 烧结收缩率大, 一般达到了 10%~20%, 而且坯体中含有 2%左右的烧结添加剂, 影响了镜坯整体的均匀性, 另外制备过程所需设备十分昂贵, 制约了常压烧结工艺技术的发展。

化学气相沉积工艺是在 900℃~1 600℃的温度下, 用 H_2 或 H_2/Ar 的混合气体作为载体, 通常采用三氯甲基硅烷作为先驱体, 热解后在基体表面沉积生成 100%致密的 β -SiC。反应式如下:



CVD-SiC 各向同性, 而且加工后可以得到良好的光学表面。但是这种方法制备 SiC 的速度非常缓慢, 通常制备的厚度在毫米级, 不能成型适合轻量化的复杂形状, 因此目前 CVD-SiC 仅应用于其他几种工艺制备的 SiC 陶瓷镜体的表面改性。

表 2 是以上几种工艺的综合比较。从表中可以看到, 反应烧结工艺的综合优势比较明显。

表 2 SiC 制备工艺的比较

Table 2 The comparison of the SiC preparations

Materials	Density $\rho/(g/cm^3)$	Components	Isotropic	Lightweight construction	Cost	Size	Preparation cycle	Surface modification
HP-SiC	~3.20	SiC+Small amounts of additives	Bad	Difficult	High	Small	Short-term	Requirement
RB-SiC	~3.04	SiC+Si	Good	Easy	Low	Small	Short-term	Requirement
SSiC	~3.10	SiC+ Small amounts of additives	Worse	Easy	Lower	Large	Long-term	Requirement
CVD-SiC	~3.21	SiC	Best	Extremely difficult	High	Small	Long-term	Un-requirement

3 SiC 光学材料加工^[10-19]

SiC 材料的表面光学加工工艺与传统的光学材料相似,但是由于其硬度较高,因此单位时间内的去除量较小,磨料必须改用碳化硼或是人造金刚石微粉才能对其表面进行更有效的磨削,其加工方法多采用数控光学加工技术 CCOS(Computer-controlled Optical Surfacing)。

数控光学加工技术(Computer-controlled Optical Surfacing)由美国 Itek 公司的 W.J.Rupp 在 70 年代初期最先提出的。它根据定量的面形检测数据,在加工过程控制模型的基础上,用计算机控制一个小磨头(直径通常小于工件直径的 1/4)对光学零件进行研磨或抛光,通过控制磨头在工件表面的驻留时间及磨头与工件间的相对压力来控制材料的去除量。在加工过程中,由于小磨头能够相对有效地跟踪非球面表面各点曲率半径的变化,因而能与非球面的面形良好吻合从而可获得很高的加工精度;同时采用计算机控制,应用定量的检测结果指导加工过程,它充分发挥了计算机执行速度快,记忆准确等优势,因而使加工的重复精度及效率大幅度提高,尤其是对于高硬度的 SiC 材料来讲,其非球面加工效率可大大提高。

到了 80 年代中后期,随着计算机及精密计量等技术的飞速发展,CCOS 技术也得到了进一步的完善。国外先进国家已基本解决了大尺寸超薄光学元件的加工问题。Itek 公司在 90~92 年期间开发出了真空自励磨头(Vacuum Activated Tools),在 CCOS 设备上加工 2 m 级厚度为 1.7 cm 的离轴抛物面,最终精度为 0.034 μm RMS,表面粗糙度小于 1 nm,加工周期为 5 个月。在如此短的时间内加工出这样高精度的镜面是手工加工所无法达到的。

我国在 CCOS 技术方面的研究始于上个世纪 80 年代末、90 年代初,浙江大学、北京理工大学、紫金山天文台等有关单位相继开展了这项技术的研究工作。图 2 所示为长春光机所在中国科学院重点课题“超光滑非球面自动加工及在线检测”的支持下,研制成功的 FSGJ-2 型非球面数控光学加工中心,该设备的研制成功使 CCOS 技术在我国进入了实用化阶段,并具备加工 1 000 mm 以内的非球面光学元件的能力,加工精度为面形误差小于 30 nm RMS,粗糙度优于 2 nm RMS。



图 2 FSGJ-2 非球面数控加工设备

Fig.2 FSGJ-2 computer-controlled machine for aspheric surface

非球面碳化硅反射镜加工的具体过程一般是从其最接近球面成型后开始的,主要的加工工序包括:反射镜的研磨、粗抛光以及表面改性后的精抛光。每一加工工序均有与之相对应的检测方法,图 3 所示为利用 FSGJ-2 完成加工的某 $\Phi 620$ mm 口径 RB-SiC 反射镜,该反射镜采用了我所自行研发的先进的消失模技术结合凝胶注模成型工艺制备而成,轻量化率达 70%以上,镜坯实现了净尺寸成型,保证了镜坯的尺寸精度减少了后续加工量,将反射镜加工周期缩短了 1 月~2 月,图 4 所示为该 RB-SiC 反射镜面形检测结果,其面形精度 RMS 为 0.025 λ ($\lambda=623.8$ nm),达到 $\lambda/40$,满足光学系统成像工程应用要求。



图 3 $\phi 620$ mm 口径 RB-SiC 反射镜

Fig.3 $\phi 620$ mm RB-SiC mirror

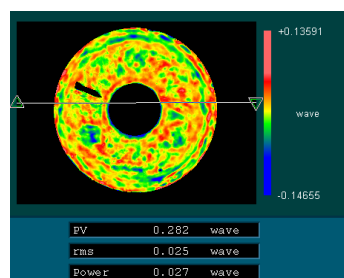


图 4 完成非球面加工的 RB-SiC 反射镜

Fig.4 RB-SiC mirror after the aspheric fabrication

4 结 论

随着未来空间成像技术的发展, 以及对于高分辨图像市场的需求越来越强烈, 新型理想反射镜材料的研制成了一个非常重要的课题。SiC 光学成像材料因其比刚度大、热膨胀系数小、尺寸稳定性好、镜面加工精度高、可高度轻量化等优点而成为未来空间光学系统主光学元件的首选材料。目前, 我国已开展相关的 SiC 光学材料的制备及应用研究工作, 进行了一定的工程化应用, 并取得了较好的成果, 但相比国外先进的 SiC 光学材料的制备及应用情况而言, 我们的技术还不成熟, 仍存在一定的问题和困难, 还需进行不断的深入研究和探索, 为大口径、轻量化非球面 SiC 反射镜的加工和应用提供有力的技术支持, 为 SiC 光学材料在航天相机上的应用提供技术保障。

参考文献:

- [1] 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: 1-124.
YAN Yong. 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: 1-124.
- [2] 闫勇, 王栋, 金光. 大口径 SiC 反射镜研制技术 [J]. 光电工程, 2010, 37(6): 108-112.
YAN Yong, WANG Dong, JIN Guang. Design technology of large aperture SiC mirror assembly [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2010, 37(6): 108-112.
- [3] 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 Yong, JIA Ji-qiang, JIN Guang. Design of new type spaceborne lightweighted primary mirror support[J]. **Optics and Precision Engineering**, 2008, 16(8): 1533-1539.
- [4] 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: 1-98.
ZHAO Wen-xing, ZHANG Ge, YANG Yong. SiC mirror fabrication of high resolution optical camera technology research report [R]. Changchun: Changchun institute of optics, fine mechanics and physics, Chinese academy of sciences, 2008: 1-98.
- [5] WANG Dong, YAN Yong, JIN Guang. Nonlinear analysis method for predicting optical surface deformations resulted from assembly process [J]. **SPIE(S0277-786X)**, 2010, 6721: 1-7.
- [6] 吴琼, 田越, 周春平, 等. 遥感图像超分辨率研究的现状和发展 [J]. 测绘科学, 2008, 33(6): 66-70.
WU Qiong, TIAN Yue, ZHOU Chun-ping, *et al.* Review of super-resolution in remote-sensing image [J]. **Science of Surveying and Mapping**, 2008, 33(6): 66-70.
- [7] 曲宏松, 金光, 张叶. “NextView 计划”与光学遥感卫星的发展趋势 [J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(6): 467-476.
QU Hong-song, JIN Guang, ZHANG Ye. NextView program and progress in optical remote sensing satellite [J]. **Chinese Journal of Optics and Applied Optics**, 2009, 2(6): 467-476.
- [8] 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, 2008, 37(1): 97-101.
YAN Yong, JIN Guang, YANG Hong-bo. Lightweight structural design of space mirror [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2008, 37(1): 97-101.
- [9] 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 Bing-xing. Research of SiC reflection mirror for space camera [J]. **Spacecraft Recovery & Remote Sensing**, 2003, 24(1): 15-18.
- [10] 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 Zhen-feng, GAO Jin-song, CHEN Hong, *et al.* Researches of the surface modification for two kinds of silicon carbide mirror in common use [J]. **Optical Technique**, 2009, 35(1): 21-24.
- [11] 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 Tong-tong, GAO Jin-song, WANG Xiao-yi, *et al.* Preliminary study of reaction bonded silicon carbide surface modification [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2008, **16**(9): 1604-1609.
- [12] 范镒, 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 Di, ZHANG Zhong-yu, NIU Hai-yan, *et al.* Surfacing fabrication of silicon carbide optical mirror [J]. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, 2003, **31**(11): 1096-1100.
- [13] 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 Wang, ZHANG Yu-ming, HAN Jie-cai. Surface machining of sic reflector [J]. **Materials Science And Technology**, 2006, **14**(6): 622-625.
- [14] 戴玉堂, 姜德生, 林伟民, 等. 碳化硅轻量反射镜的超精密加工 [J]. 特殊加工工艺与技术, 2005(11): 20-22.
DAI Yu-tang, JIANG De-sheng, LIN Wei-min, *et al.* Ultraprecision fabrication of sic lightweight mirror [J]. **Manufacturing Technology & Machine tool**, 2005(11): 20-22.
- [15] 张峰, 范镒, 李锐刚, 等. 非球面 SiC 反射镜的加工与检测 [J]. 应用光学, 2008, **29**(6): 1004-1008.
ZHANG Feng, FAN Di, LI Rui-gang, *et al.* Fabrication and testing of aspheric silicon carbide mirror [J]. **Journal of Applied Optics**, 2008, **29**(6): 1004-1008.
- [16] 宣斌, 谢京江, 宋淑梅. 多模式组合抛光技术在光学加工中的应用 [J]. 光学 精密工程, 2011, **19**(1): 41-50.
XUAN Bing, XIE Jing-jiang, SONG Shu-mei. Application of multi-mode combined polishing to optical manufacturing [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2011, **19**(1): 41-50.
- [17] 张峰. 高精度离轴凸非球面反射镜的加工与检测 [J]. 光学 精密工程, 2010, **18**(12): 2557-2563.
ZHANG Feng. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2010, **18**(12): 2557-2563.
- [18] 徐玲娣, 张学军, 王旭. 反应烧结 SiC 反射镜表面改性技术 [J]. 光电工程, 2009, **36**(1): 120-124.
XU Ling-di, ZHANG Xue-jun, WANG Xu. Surface Coating Technique of Reaction Bonded SiC Mirrors [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, **36**(1): 120-124.
- [19] 闫锋, 范镒, 张斌智, 等. 一种 SiC 非回转对称非球面的加工与检测 [J]. 光电工程, 2009, **36**(3): 135-139.
YAN Feng, FAN Di, ZHANG Bin-zhi, *et al.* Manufacturing and Testing of a SiC Unrotational-symmetric Aspherical Optics [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, **36**(3): 135-139.



本期组稿: 陈伟明
责任编辑: 杨洪名
英文编辑: 庞 洪