

文章编号 1004-924X(2006)02-0179-04

# 空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试

张剑寒,张宇民,韩杰才,赫晓东,姚 旺

(哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**碳化硅由于其优异的机械性能和热物理性能而成为颇具吸引力的反射镜材料。采用反应烧结碳化硅(RB-SiC)材料制备了空间用反射镜体,用化学气相沉积(CVD)工艺在镜体镜面沉积一层致密的碳化硅薄膜,反射镜采用蜂窝状背面开放式轻量化结构。对直径为250 mm反射镜的组织、性能做了一系列研究测试。结果表明:反射镜体为Si/SiC两相组织,薄膜为单相SiC,反射镜的机械、热性能优异,薄膜与基体结合强度为345.5 MPa,研磨后镜面表面粗糙度达到1.487 nm rms。采用本文工艺方法有能力制备米级直径的空间用碳化硅反射镜。

**关键词:**空间用反射镜;反应烧结;化学气相沉积;碳化硅;光学加工;光学检验

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A

## Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror

ZHANG Jian-han, ZHANG Yu-min, HAN Jie-cai, HE Xiao-dong, YAO Wang

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Silicon carbide (SiC) is an attractive mirror material due to its superior mechanical and thermal physical properties compared to conventional optical materials. In this paper, a space-borne mirror blank was fabricated by reaction bonded silicon carbide (RB-SiC), and full density SiC thin film was coated on the surface of mirror blank by Chemical Vapor Deposition (CVD) process. The space-borne mirror is lightweight structure with honeycomb back opened. The microstructure and properties of a 250 mm diameter circular mirror were studied and tested. Experimental results show that the mirror blank is Si/SiC two-phase structure and the film is SiC single phase; SiC mirror has excellent mechanical and thermal property; the adhesion strength stress between substrate and film is 345.5 MPa. After grinding, mirror surface precision is 1.487 nm rms. The space-borne SiC mirror of meter class diameter can be fabricated by both reaction bonded and CVD process.

**Key words:** space-borne; mirror; reaction bonding; CVD; SiC; optical fabrication; optical testing

## 1 引言

随着前苏联第一颗人造卫星的成功发射,人

类跨入了航天时代。世界各强国不断投入大量人力、物力和财力进行航天探索,航天技术成为一个国家综合国力和科学技术发展的重要标志。空间光学系统作为空间飞行器的“眼睛”具有极其重要

的作用,空间光学系统具有不受地域限制、侦查区域广、可进行连续动态探测等一系列优点,因而对于空间用光学系统展开研究具有重要意义。目前空间用光学系统通常采用反射式结构设计,反射镜是空间用光学系统中最重要零件,具有非常重要的军用、民用价值。空间用反射镜可以应用于大型宇航望远镜、预警卫星、探测卫星、侦察卫星、气象卫星、高能激光发射器、激光雷达系统、X射线和真空紫外线望远镜、空间用红外望远镜和高分辨率相机等诸多方面。随着航天技术的迅速发展,对空间用反射镜的要求也日益提高,其尺寸越来越大而重量越来越轻,传统的反射镜材料已经难以适应,因此研究、开发和应用性能更加优越的反射镜材料,制备高精度、大尺寸和轻量化的空间用反射镜成为目前的研究重点<sup>[1-3]</sup>。

## 2 空间用碳化硅反射镜的设计与制备

### 2.1 反射镜材料的选择与轻量化结构设计

制备空间用反射镜的材料主要有光学玻璃、

金属铍、金属铝、金属镍、硅和碳化硅等。考虑到空间环境的具体情况,适用于空间用反射镜的材料主要需要考虑以下因素,如:材料结构,材料均匀性和稳定性,热稳定性能,光学散射性能,反射性能和制造周期以及制造成本等方面。其中结构性能和热性能最为重要。材料的结构特性是指材料的刚度与强度,可根据材料在加载时产生的应力和变形来对比不同的材料在结构性能方面的优劣。结构加载应该考虑的是静态载荷、随机振动和声学载荷(在发射过程中产生的),重力释放以及在运输、装配和装卸过程中产生的冲击等方面。材料的热性能主要是指热导率和热膨胀系数,可根据材料在被施加静态或动态载荷后而产生的热变形与热应力的来评价材料热性能方面的优劣。表 1<sup>[4-8]</sup>显示了室温条件下空间用反射镜候选材料的机械性能和物理性能参数。

表 1 候选材料的机械性能和物理性能

Tab. 1 Mechanical and physical properties of selected materials

材料	弹性模量 (GPa)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比热 (J/kg·K)	热膨胀系数 (1/K)	热导率 (W/m·K)
金属铝 6061-T6	69	2 710	960	2.3e-5	171
金属铍 I-220	303	1 850	1 820	1.14e-5	194
金属镍	197	8 913	460	1.35e-5	88.96
反应烧结碳化硅	350	3 086	749	2.50e-6	170
CVD 碳化硅	461	3 210	640	2.20e-6	300
光学玻璃	72	2 200	745	5.50e-7	1.38

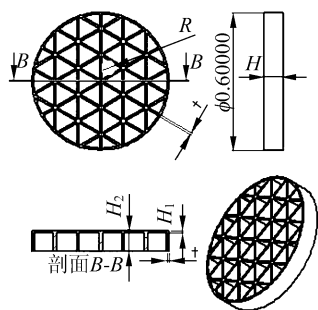
通过比较可以看出,碳化硅的密度适中,但是刚度大,同样质量的碳化硅镜面不易变形,同时由于碳化硅材料硬度大而且脆,因此致密的碳化硅材料表面粗糙度可以控制得很好。碳化硅材料的热导率高,热膨胀系数低,具有良好的热物理性能。光学玻璃的热性能更好,但是光学玻璃的刚度小,容易变形;金属铍的刚度大,密度低,但是热膨胀系数较大,而且金属铍含有毒性也严重制约了它的应用。

根据制造工艺的不同,碳化硅的性能会有很大差异,通常制备空间用反射镜的工艺有反应烧结碳化硅、化学气相沉积碳化硅和热压碳化硅等,

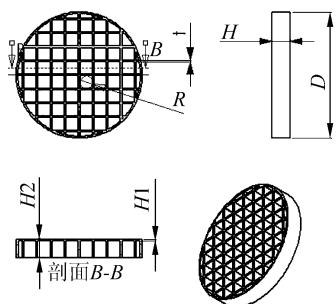
其中反应烧结碳化硅可以通过浇注成型的方法,能够制备近无余量加工复杂形状的零件,极大地减少后续机械加工成本,成为低成本,短周期的工艺手段。但是反应烧结碳化硅具有 Si/SiC 两相组织,由于硅的硬度较低而碳化硅硬度极大,硬度的差异导致难以磨削加工成精密的光学表面,因而采用在反应烧结碳化硅基体上沉积一层致密的化学气相沉积(CVD)碳化硅的工艺方法,原因是 CVD 碳化硅具有完全的致密度,材料硬而脆,可以精密研磨加工成精密的光学表面,同时材料的机械性能和热物理性能和反应烧结碳化硅相近<sup>[9-10]</sup>。本文采用反应烧结工艺制备大尺寸空间

用反射镜体,采用化学气相沉积工艺在镜体上沉积一层致密的碳化硅薄膜,使用金刚石作为磨粒,对空间用反射镜进行磨削加工,并对空间用反射镜的机械性能和物理性能进行了测试。

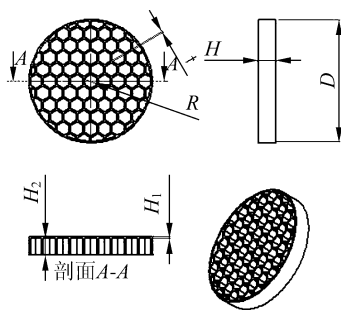
通常的空间用反射镜轻量化结构主要采用开放式背面结构、三明治结构和泡沫核心结构等形式。开放式结构是在一个面板的背面加上规则的加强筋列阵(三角形、四边形和六角形是通常的列阵形势);三明治结构是在开放式背面结构外面再加上一个加强面板;泡沫核心结构和三明治结构相似,不同的是将低密度的泡沫核心置于前后面板之间,代替加强筋列阵,用来承担载荷。三明治结构和泡沫核心结构的轻量化效果最佳,但是后面板的粘结工艺复杂,增加了工艺难度和成本<sup>[3,11]</sup>。本文采用开放式背面结构,正面为一定厚度的圆形平面面板,蜂窝状加强筋结构分别为三角形、四边形、六边形和扇形单元,如图 1 所示。



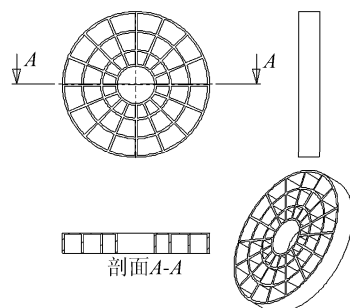
(a) 三角形结构  
(a) Triangle cell



(b) 正方形结构  
(b) Square cell



(c) 正六边形结构  
(c) Hexagon cell



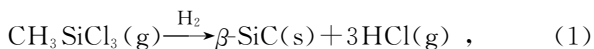
(d) 扇形结构  
(d) Sector cell

图 1 空间用碳化硅反射镜结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of SiC space-borne mirror

### 2.2 反射镜制备工艺

反应烧结工艺是首先通过颗粒配比按照一定比例将碳化硅微粉和碳粉混合,然后加入稀释剂和固化剂,浇注进入模具,干燥,打开模具后,放入烘干炉中烘干,制备成具有多孔结构的碳化硅反射镜先驱体,然后再将先驱体和一定量的硅粉放置入真空烧结炉中,加温到硅的熔点以上进行烧结,这时硅微粉熔化渗入先驱体中和先驱体中的碳发生反应生成新的碳化硅,同时把先驱体中的碳化硅微粉粘结,生成完全致密的碳化硅反射镜体。镜体材料组成成份分别为初始碳化硅,烧结碳化硅和未反应的残余硅。将碳化硅反射镜体镜面表面进行初步的磨削加工,表面磨平以后,再在反射镜坯体镜面表面沉积一层碳化硅薄膜,薄膜的制备采用普通化学气相沉积,成膜物质为三氯甲基硅烷  $\text{CH}_3\text{SiCl}_3$ ,采用氢气( $\text{H}_2$ )作为催化剂。化学反应方程式为:



沉积温度为 1 573 K,沉积完毕后随炉冷却。

为了获得平整光滑的表面还需要对镜体进行磨削加工,加工方法为高速精磨,采用平磨方式。高速精磨是指用金刚石固着磨料进行磨削,一般采用金刚石磨片进行精磨。金刚石磨片所用金刚石粒度范围为 W5~W40,采用两道精磨模,粒度之间应有足够间隔。第一道精磨一般取 W14,精磨片浓度一般小于 50%。第一道精磨的精磨片结合剂硬度可大些,第二道的可小些。

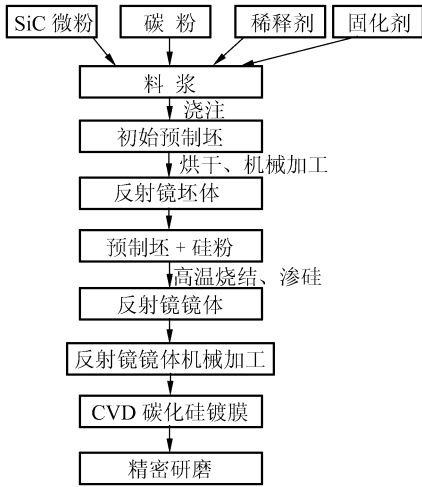


图 2 空间用碳化硅反射镜制备工艺示意图

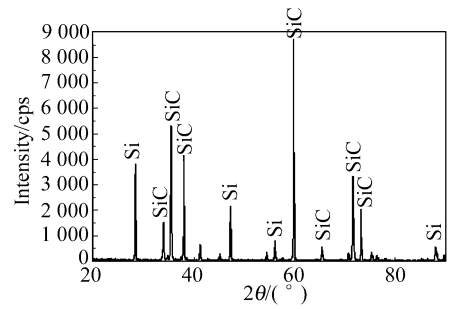
Fig. 2 Preparation process sketch of SiC space-borne mirror

空间用碳化硅反射镜的制备工艺过程如图 2 所示。通过这种工艺,能够制备直径将近 1 m 的空间用反应烧结碳化硅反射镜体,同时制造出直径为 250 mm 的六边形蜂窝状加强筋结构的圆形平面反射镜镜片,用来证明整个工艺过程的可行性,并对其进行了各项性能的测试。

### 3 碳化硅空间用反射镜的组织性能

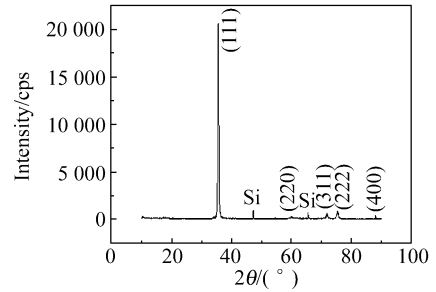
图 3 显示了反应烧结碳化硅和化学气相沉积碳化硅薄膜的 X 射线衍射分析图谱,可以看到,前者为 Si/SiC 两相组织,后者为  $\beta$ -SiC 组织,并且在薄膜表面存在少量的 Si,原因可能是反应产物的残余。图 4 显示的是反应烧结碳化硅和 CVD 碳化硅薄膜的光学金相照片,前者可以看到深色碳化硅和浅色硅两相组织;后者可以看到沉积过程中产生的团簇状小岛,磨削加工后小岛被磨削掉,留下黑色的区域。

对反应烧结碳化硅材料的性能进行了测试,



(a) 反应烧结碳化硅

(a)RB-SiC

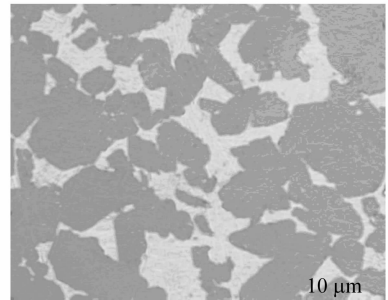


(b) 化学气相沉积碳化硅

(b)CVD-SiC

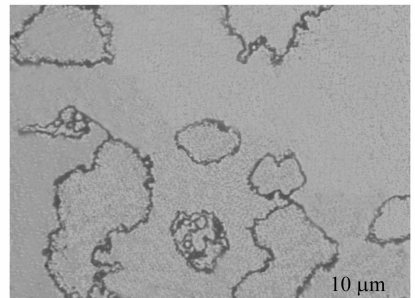
图 3 CVD-SiC 薄膜的物相分析

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of CVD-SiC film



(a) 反应烧结碳化硅

(a)RB-SiC



(b) 化学气相沉积碳化硅

(b)CVD-SiC

图 4 碳化硅材料金相组织照片

Fig. 4 Metallograph of SiC microstructure