

文章编号 1004-924X(2012)11-2360-05

反应连接 230 mm 口径 RB-SiC 反射镜

张斌智^{1,2*}, 张 舸¹, 董德义^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
中科院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京, 100039)

摘要:针对传统工艺难以制备口径大于 1.2 m 的整块反射镜的问题,提出了反应连接制备大口径 RB-SiC 反射镜的工艺。该工艺在素坯阶段实现连接,一次反应烧结完成坯体的致密化和镜体的连接。采用该工艺制备了 230 mm 口径的 RB-SiC 反射镜,并使用 FSGJ-2 光学数控机床对反射镜进行了研磨、粗抛光和精抛光加工,其镜面面形精度 RMS 值达到了 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm)。在环境温度 (20 ± 3) °C 检测了连接反射镜,其面形变化 RMS 值小于 $\lambda/300$,热循环试验前后连接反射镜面形没有明显变化;连接镜体表面在焊缝处粗糙度 $R_a < 3.3$ nm,连接层与基体的显微结构基本相似,热性能相匹配。研究表明,用新型反应连接技术制成的 RB-SiC 反射镜可以满足空间光学应用要求。

关键词:反应连接;碳化硅;RB-SiC 反射镜;表面轮廓

中图分类号: TN305; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122011.2360

230 mm aperture RB-SiC mirror by reaction-formed joint

ZHANG Bin-zhi^{1,2*}, ZHANG Ge¹, DONG De-yi^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: binzh123@163.com*

Abstract: As the aperture for a monolithic mirror was limited in 1.2 m by traditional technologies, a new reaction-formed joint technology for RB-SiC was proposed. With the proposed technology, the SiC mirror was joined in the green body process, and the green body densification and the joint of mirror were finished in the same sintering process. A 230 mm diameter RB-SiC mirror was fabricated by this technology. After milling and polishing finely with the FSJG-2 facility, the figure error of the mirror surface is less than $\lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm). The mirror was tested in the temperature range of (20 ± 3) °C, and the tested results show that the change of the figure error of the mirror surface is less than $\lambda/300$, and the mirror surface figure is not changed obviously after the thermal cycle test. Moreover, the roughness of the surface near the joint line is 3.3 nm, and its microstructure is similar to

收稿日期:2012-01-16;修订日期:2012-03-01.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 61036015);科技部国际合作项目(No. 2011DFA50590)

that of the RB-SiC ceramic. The thermal property of welding line is matching with that of RB-SiC ceramic. Obtained results demonstrate that the reaction-formed joint technology for the RB-SiC mirror satisfies the need of the large aperture mirror used in space optics.

Key words: reaction-formed joint; SiC; RB-SiC Mirror; Surface profile

1 引 言

由于碳化硅陶瓷具有比刚度高、热稳定性较好、表面光学加工性能良好和制作成本较低等优点,目前已经成为国际上新一代空间高分辨率相机反射镜材料的发展趋势,用其制成的反射镜口径也越来越大^[1]。然而,随着航天遥感工程的飞速发展,对主反射镜的尺寸有了更高的要求,利用现有的工艺制造口径在 1.2 m 以上的单块 SiC 陶瓷非常困难,因此选择一种合理的连接工艺实现更大尺寸 SiC 反射镜技术更具可行性^[2]。现在,国内外相关公司及科研院所各自发展了一系列的连接 SiC 反射镜的方法,其中,具有代表性的有美国 CoorSTeK 公司研制的分块轻量化 SiC 焊接技术和 ASTRIUM 公司发展的高温焊接技术,其焊料主要成分均采用与 SiC 热膨胀系数相匹配的硅合金材料,得到的焊接反射镜均具有良好的机械和热力学性能^[3]。哈尔滨工业大学也对反应烧结碳化硅钎焊技术进行了研究,成功制作了由 3 块扇形子镜钎焊连接而成的 $\Phi 600$ mm 碳化硅反射镜。

用于碳化硅陶瓷连接的主要方法有钎焊、扩散焊和反应连接等。钎焊和扩散焊的连接层采用金属合金材料,力学性能较差,热力学性能不能与母材相匹配,因此达不到空间反射镜的光学应用要求^[4]。反应连接工艺需要对碳化硅陶瓷的连接面进行抛光处理^[5],其加工难度相对较大,而且对于 RB-SiC 陶瓷来说渗硅工艺重复。因此,本文研制了一种针对于 RB-SiC 陶瓷的新型反应连接工艺。为使该反应连接制备的 RB-SiC 反射镜满足空间可见光波段光学系统的需要。首先对反射镜进行光学加工,使其面形持续收敛到一定精度,即面形误差 RMS 值小于 $\lambda/50$;另外在使用过程中,使反射镜镜面形状和尺寸保持稳定,不同温度

下的面形变化均在使用要求内^[6]。最后对反应连接制备的反射镜进行了检验,其精抛光后的微观粗糙度 R_a 在可见光波段小于 1 nm,满足空间光学使用要求。

2 新型反应连接工艺制备 230 mm 口径 SiC 反射镜

为了验证反应连接 SiC 反射镜的空间适用性,本文采用新型的反应连接工艺制备了一块 230 mm 口径的 SiC 反射镜。连接工艺流程如图 1 所示:先采用凝胶注模成型工艺制备两块直径为 230 mm 的半圆形碳化硅陶瓷素坯,再将素坯加热到 600 °C 排胶,然后把连接面加工平整后待用;以酚醛树脂的酒精溶液作为溶剂与 10 μm 的碳化硅微粉充分混合,制备出固相含量为 50% 的均匀碳化硅浆料;将碳化硅连接浆料涂覆在母材

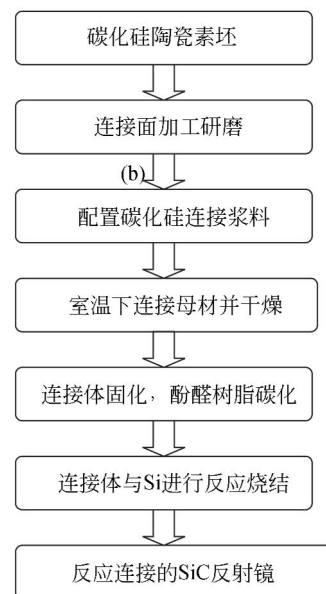


图 1 RB-SiC 反射镜反应连接工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of reaction-formed joint RB-SiC mirror

连接面,在一定压力下进行连接,并在室温下干燥;连接体在 200 °C 左右固化并在 Ar 气保护下使酚醛树脂碳化;最后,经过简单的表面修型后与适量的硅粉放置在高温真空烧结炉中进行反应烧结,得到如图 2 所示的 $\Phi 230$ mm 碳化硅连接坯体。由于连接浆料是由碳化硅颗粒和酚醛树脂等混合配制而成的,200 °C 左右酚醛树脂固化后,在更高的温度下发生热解。热解后的残余碳会和过量的 Si 反应生成 SiC,而多余的 Si 会在毛细管力的作用下进入坯体填充空隙,因此最终烧结反射镜焊缝处基本不存在残余碳或孔隙。该工艺使用与素坯配方相同的 SiC 浆料把素坯连接起来,然后将连接体放置在高温真空烧结炉中进行一次反应烧结,就可以同时完成坯体的致密化和镜体的连接。由于 SiC 陶瓷素坯易于加工,因此该工艺降低了连接面的加工难度,简化了整个工艺流程。

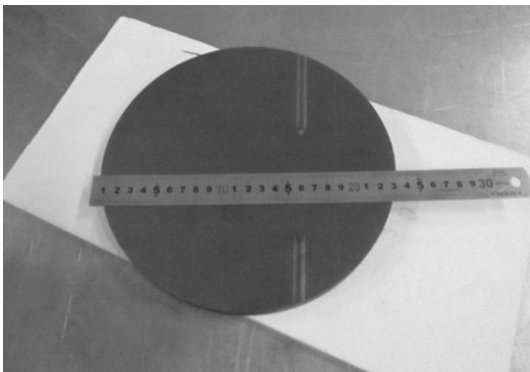


图 2 230 mm 口径反应连接 RB-SiC 反射镜

Fig. 2 $\Phi 230$ mm reaction-formed joint RB-SiC mirror

3 230 mm 口径反应连接 RB-SiC 反射镜加工实验

反应连接的 230 mm 口径反射镜研磨、粗抛光和精抛光均采用自研制的 FSGJ-2 光学数控机床进行加工,研磨阶段使用该数控机床集成的在线轮廓测量系统进行检测,检测精度优于 $5 \mu\text{m}$ (PV),粗抛光和精抛光阶段采用 Zygo 公司 GPIWS 1000 波长调制干涉仪进行面形检测^[7]。如图 3 所示,最后焊接反射镜面形收敛到 RMS 值 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)。从图中可以看到整个面形二维图在焊缝处是连续的,说明焊缝对整个连接

体表面的面形并无影响。

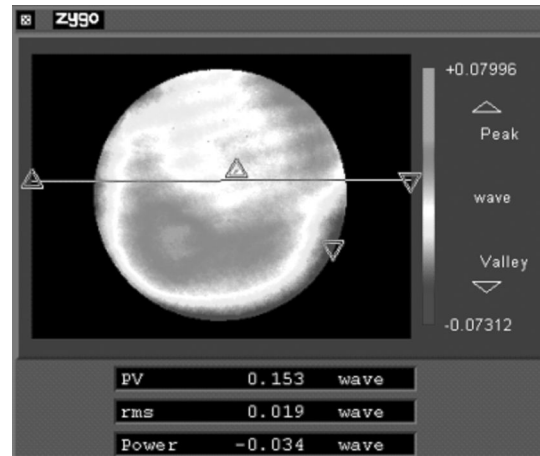


图 3 反射镜干涉检测结果

Fig. 3 Interferometry testing results of mirror

空间用反射镜镜面的形状和尺寸必须保持很好的稳定性,热变形对镜体表面面形的影响是一个非常重要的因素^[8]。为了测试该反射镜的连接层与母材的热匹配问题,在不同环境温度下对 230 mm 口径的 RB-SiC 反射镜进行了检测。在环境温度分别为 17.2, 19.3, 20.9 和 23.1 °C 下对反射镜面形进行了检测。结果如表 1 所示,反射镜面形变化 RMS 值小于 $\lambda/300$ 。将该反射镜在 $-25 \sim 65$ °C 进行快速的温度振荡,如此反复 3 次,待反射镜温度恢复到室温后再次测试其表面面形,发现反射镜面形在热循环前后没有明显变化。

表 1 环境温度变化时反射镜面形的检测结果

Tab. 1 Testing results of surface figure errors in different temperatures

环境温度/°C	PV 值	RMS 值	Power 值
17.2	0.156 λ	0.019 λ	0.031 λ
19.3	0.142 λ	0.021 λ	-0.010 λ
20.9	0.153 λ	0.019 λ	-0.034 λ
23.1	0.149 λ	0.021 λ	-0.021 λ

图 4 是使用 Zygo 公司 NewView 7200 表面轮廓仪检测反射镜焊缝附近区域的结果(测量范围是 $1.41 \text{ mm} \times 1.06 \text{ mm}$)。表面粗糙度 R_a 值为 3.3 nm,与基材粗糙度值一致。一般 SiC 反射镜要经过表面镀硅改性然后再抛光来提高表面质

量,改性层精抛光后表面粗糙度 R_a 值小于 1 nm,能够满足光学表面要求^[9]。图 4 右部分为检测范围微观结构,颜色较深的区域是素坯制备阶段加入的 α -SiC 颗粒,颜色较浅的区域是反应烧结阶段液态硅与坯体中的碳反应生成的 β -SiC,较亮的区域是填充坯体空隙处的硅,竖线之间的部分是连接层。

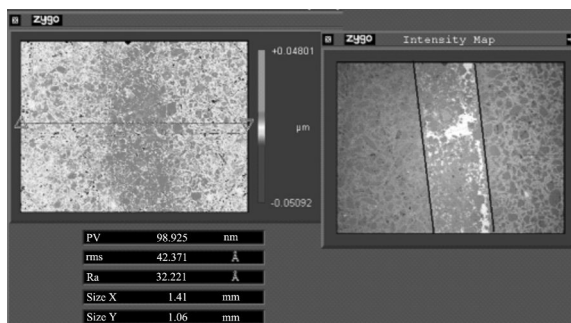


图 4 反射镜焊缝处微观检测结果

Fig. 4 Roughness of mirror surface near joined line

参考文献:

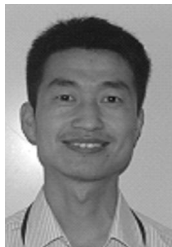
- [1] 张舸,赵汝成,赵文兴. 碳化硅陶瓷新型反应连接技术[J]. 光学精密工程,2008, 6(6): 1037-1041. ZHANG G, ZHAO R CH, ZHAO W X. Novel reaction-formed joint technology for reaction bonded silicon carbide ceramics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 6(6): 1037-1041. (in Chinese)
- [2] MATSON L E, CHEN M Y. Enabling materials and processes for large aerospace mirrors [J]. *SPIE*, 2008, 7018: L01-L09.
- [3] TOULEMONT Y, PASSVOGEL T, PILLBRAT G, et al.. The 3.5 m all SiC telescope for HERSCHEL [J]. *SPIE*, 2004, 5487: 1119-1128.
- [4] 杨李茗,叶海仙. 大口径大曲率半径光学元件的高精度检测[J]. 光学精密工程,2011, 19(6): 1207-1212. YANG L M, YE H X. High-precision metrology for optical components with large-apertures and large radii of curvature [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1207-1212. (in Chinese)
- [5] 崔天刚,王永刚,马冬梅,等. Wolter I型反射镜面形在线检测装置设计[J]. 光学精密工程,2010, 18(8): 1801-1806. CUI T G, WANG T G, MA D M, et al.. Design of online measuring device for surface profile of Wolter Type I mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1801-1806. (in Chinese)
- [6] EALEY M A, WEAVER G Q. Developmental history and trends bonded silicon carbide mirrors [J]. *SPIE*, 1996, 2857: 66-72.
- [7] 韩媛媛,张宇民,韩杰才. 碳化硅反射镜技术的研究现状[J]. 材料导报,2005, 19(4): 5-8. HAN Y Y, ZHANG Y M, HAN J C. Current status of research on silicon carbide mirror technology [J]. *Materials Review*, 2005, 19(4): 5-8. (in Chinese)
- [8] 王旭,张学军,徐领娣,等. 固着磨料加工碳化硅反射镜的实验[J]. 光学精密工程,2009, 17(4): 771-777. WANG X, ZHANG X J, XU L D, et al.. Experiment of grinding SiC mirror with fixed abrasive [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 771-777. (in Chinese)
- [9] 陈红,王彤彤,高劲松,等. 应用 SiC 反射镜表面改性技术提高 TMC 光学系统信噪比[J]. 光学精密工程,2009, 17(12): 2952-2958. CHEN H, WANG T T, GAO J S, et al.. Improvement of signal noise ratio of TMC optical system by SiC surface modification technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2952-2958. (in Chinese)

4 结 论

本文使用新型反应连接工艺制备了 230 mm 口径 RB-SiC 反射镜,经过研磨和抛光加工,反射镜面形收敛到 RMS 值 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm)。连接反射镜在环境温度 (20 ± 3) °C 下检测,面形变化 RMS 值小于 $\lambda/300$;焊接反射镜在连接处的粗糙度 R_a 值小于 3.3 nm,连接层与基体的显微结构基本相似,热性能相匹配。实验结果表明,新型反应连接技术制成的 RB-SiC 反射镜可以满足空间光学系统的应用要求。

- [10] 张峰. 高精度离轴凸非球面反射镜的加工及检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2557-2563.
ZHANG F. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2952-2958. (in Chinese)
- [11] 刘兆栋, 陈磊, 韩志刚, 等. 斜入射干涉检测大口径碳化硅平面反射镜[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1437-1443.
LIU ZH D, CHEN L, HAN ZH G, *et al.*. Measurement of large aperture SiC flat mirrors by oblique incidence interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1437-1443. (in Chinese)
- [12] 李世斌, 吕振林, 高积强, 等. 反应连接碳化硅材料接头的力学和电性能[J]. 金属材料与工程, 2003, 32(8): 674-676.
LI SH B, LÜ ZH L, G J Q, *et al.*. Mechanical and electrical properties of reaction-formed joints in silicon carbide ceramic material[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2003, 32(8): 674-676. (in Chinese)

作者简介:



张斌智(1979—),男,山西临猗人,博士研究生,助理研究员,2001年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学加工和检测方面的研究。E-mail: binzh123@163.com



董得义(1979—),男,汉族,博士研究生,助理研究员,2002年、2005年于北京工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间光学遥感器工程分析、优化设计、力学试验等方面的研究。E-mail: s200201029@163.com



张 舸(1980—),男,重庆荣昌人,博士,副研究员,2003年于长春理工大学获学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间用轻型碳化硅反射镜制备技术的研究。E-mail: zhanggeciomp@126.com