

大口径 SiC 反射镜的焊接加工和测试

张斌智^{1,2}, 张忠玉¹, 张学军¹

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

摘要: SiC 是目前空间用大口径反射镜的首选材料, 随着空间光学系统的发展, 出现了 1 m 以上空间用 SiC 反射镜的需求。对该反射镜采用焊接拼接然后再进行加工可以节约成本, 降低风险。作为演示实验件, 首先, 对直径为 600 mm 的焊接 SiC 反射镜进行了焊接拼接, 粗磨成型、精细研磨和粗抛光。然后, 采用 CCOS 技术对反射镜进行了精抛光, 并分析了加工过程中焊缝边缘优先去除的原因和抛光过程镜面变形对加工结果的影响。最后, 反射镜面形收敛到 RMS 值 $1/20\lambda$ ($\lambda = 632.8$ nm)。结果表明, 所采用的焊接技术和加工工艺制造的反射镜可以满足空间反射镜的需要。

关键词: 焊接 SiC 反射镜; 计算机控制表面成形; 残余应力; 焊缝

中图分类号: TH762 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)01-0074-05

Fabrication and testing of brazed SiC space large aperture mirror

Zhang Binzhi^{1,2}, Zhang Zhongyu¹, Zhang Xuejun¹

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: SiC is the preferential material for space large aperture mirror at present. With the development of space optical system, SiC mirror with the aperture larger than one meter is needed. It is not economical and safe to make the monolithic body directly. The SiC mirror brazed assembly with several segments can solve these problems. In this paper, a $\Phi 600$ mm SiC plane mirror as demonstration welded with 3 radial segments was roughly grinded to the required figure, finely grinded and roughly polished at first, then the mirror was finely polished by the technology of CCOS, the RMS of the figure error was less than $1/20\lambda$ ($\lambda = 632.8$ nm) finally. The problems of the preferential removal near braze joint and material remove rate influenced by deformation of mirror surface were solved. The results conclude that the brazed SiC mirror can meet the requirement of large aperture optical systems.

Key words: brazed SiC mirror; CCOS; residual stress; brazing line

收稿日期: 2010-04-10; 修订日期: 2010-06-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61036015)

作者简介: 张斌智 (1979-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事光学加工和检测方面的工作。Email: binzhi163@163.com

导师简介: 张学军 (1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。Email: zxj@ciomp.ac.cn

0 引言

新一代的空间对地光学信息收集系统,不仅要求其具有高的地面像元分辨力,还要有大的覆盖宽度。这使得光学系统不断向大口径、离轴化、高度轻量化的方向发展^[1],满足我国国防空间技术对光学系统的高质量、高分辨力和覆盖宽度的技术需要。其中,光学遥感相机的核心元件——优质轻型反射镜的制造一直影响着系统的研制和发展。

地面像元分辨力和覆盖宽度是衡量空间光学成像系统的重要指标^[2],在波段范围一定的情况下,只有通过增大系统孔径才能进一步提高系统的角分辨率和覆盖宽度。SiC 材料以其优越的光学性能、机械性能和热性能,成为目前空间大口径反射镜的首选。1 m 口径的 SiC 反射镜能满足大部分空间光学系统的要求^[3],但是在获得更大口径 SiC 反射镜时,如果直接制造整块 SiC 镜体,不仅会大大增加成本,而且存在很大的风险,例如,出现镜体材料分布不均,抛光后局部出现气孔、裂缝等现象。如果将数块 SiC 子镜采用焊接的办法进行连接再进行整体加工可解决这些问题。

在欧洲航天局 HERSCHEL 空间望远镜计划中,由 BOOSTEC 公司参与制造的 3.5 m 口径主镜将成为世界上口径最大的空间光学成像主镜。它的质量仅为 250 kg,由 12 片扇形子镜焊接组成。相比之下,由 ULE 制成的直径为 2.4 m 的哈勃望远镜主镜重 829 kg,如果用同样的玻璃制造 HERSCHEL 望远镜的主镜,质量将达到 1 500 kg,采用 SiC 陶瓷材料让它的质量减轻了 83%^[4]。

1 焊接 SiC 反射镜及其残余应力的分析

作为大口径(直径 1 m 以上)焊接 SiC 反射镜的演示论证工件,笔者制作了一块直径为 600 mm 的焊接 SiC 反射镜(参数见表 1),首先将 3 块扇形子镜焊缝接口平面用金刚石微粉抛光处理后,使用热胀系数与 SiC 最接近的合金材料,采用扩散焊接的办法将反射镜焊接组成直径 612 mm 的圆形平面反射镜。

为了获得焊接 SiC 反射镜的加工参数和工艺过程,将反射镜加工到 RMS 值 $1/20\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm)。加工参数如表 1 所示。

表 1 焊接 SiC 反射镜的参数

Tab.1 Parameters of brazed SiC mirror

Diameter/ mm	Thickness/ mm	ROC/mm	Weight/kg	Light weight ratio
612	65	∞	4.5	67%

空间用反射镜的镜面形状和尺寸必须保持很好的稳定性,这就要求在制备过程中,反射镜坯体应该始终保持较小的内应力,以保证后续加工和使用的精度。焊接 SiC 反射镜的过程中存在大量的残余应力,具有以下特点:

(1) 它在材料内部平衡,即在一个平面上的拉压绝对值相等。

(2) 不稳定,当它在材料内部一处发生变化,为力求平衡其他处也发生变化。特别是受到振动、热冲击等外界作用,残余应力释放,导致镜面变形。

2 加工工艺过程

对 600 mm 焊接 SiC 反射镜进行加工,在误差大于 $5 \mu\text{m}$ 的研磨阶段,采用南京利生机床厂生产的 YPF-1200 抛光机进行加工,采用接触式轮廓仪检测;在误差小于 $5 \mu\text{m}$ 后的抛光阶段,采用 Zygo 公司 600 mm 口径的干涉仪进行干涉检验。当面形误差不再是环带差、传统单轴机抛光法面形收敛速度降低的情况下,改用光学数控加工中心的小磨头加工方法进行抛光。

2.1 粗磨成型

焊接后的反射镜面形误差大,焊缝处有凸起的焊料残留,尽管在焊接过程中采取了一定的措施保证各个焊接子镜的镜面共面,但各个子镜之间仍然存在一定的角度,需要进行粗磨成型,去除大误差。为了提高加工效率,采用南京利生机床厂生产的 YPF-1200 抛光机进行粗磨,主轴转速为 10~15 r/min,偏心调节行程为 80~150 mm,摆架摆动频率为 20~30/min。采用粒径为 50~60 μm 的散粒金刚石微粉,直径为 300 mm 的铁质磨盘,磨盘压力由重块和气缸共同作用产生。由于铸铁盘的硬度小于 SiC 材料,所以隔一段时间用刀口平尺检测磨盘是否出现变凹或变凸,并及时进行修正^[5]。通过调整磨盘相对于反射镜的位置和摆架的摆幅大小控制工件的表面面形。为了使工件表面具有良好的表面质量,减少表面的破坏层深度,要注意控制磨料的浓度,最后一次加入磨料时,待磨料充分磨

细后再将工件取下,检查表面是否有划痕,整个工件表面是否都开始均匀去除。粗磨完成后,反射镜的面形误差小于 $30\ \mu\text{m}$ (PV)。

2.2 细磨和粗抛光

为了逐渐提高反射镜的表面质量,去除反射镜下表面破坏层的影响,依次使用粒径为 $30\sim 40\ \mu\text{m}$ 、 $14\sim 28\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim 16\ \mu\text{m}$ 、 $4\sim 8\ \mu\text{m}$ 和 $1.5\sim 3.5\ \mu\text{m}$ 的金刚石微粉磨料进行加工。用接触式轮廓仪检验面形,检验精度小于 $5\ \mu\text{m}$ 。细磨最后阶段使用 $1.5\sim 3.5\ \mu\text{m}$ 金刚石微粉的磨料进行加工,当面形检测误差小于 $5\ \mu\text{m}$,用沥青磨盘抛光,Zygo 干涉仪进行面形检验,干涉数据指导抛光加工。最后在保持面形误差不变的情况下,整个镜面均匀去除。

为了将焊接 SiC 镜体内部的残余应力逐步缓慢释放,避免残余应力突然释放导致不良后果。加工过程中工作台与反射镜之间放置海绵、胶皮等软性材料,使用质量较轻的磨盘加工,对工件的装卡也需要进行软性固定,加工 0.5 h 进行镜体外观检查并对装卡装置进行重新固定。

2.3 采用计算机控制光学表面成形技术精抛光

当面形误差不再是环带差,传统单轴机进行抛光面形收敛的速度降低时,开始采用计算机控制光学表面成形技术(CCOS)加工的方法进行抛光。这种方法是指根据定量的面形检测数据,在加工控制模型的基础上,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。使用自行研制的基于 CCOS 技术的非球面数控加工中心(FSGJ-2)对该反射镜进行抛光加工。磨头在气缸活塞的推动下与镜面保持一定的压力,在计算机的控制下沿选定的路径在镜面上运动,驻留时间和转动速度决定于原始误差的大小。机床采用了六轴联动的运行方式,可以选用直角坐标和极坐标两种加工方式。与传统单轴机加工的方法相比,采用数控小磨头加工可控制的参数更多,针对性更强。

为了消除加工轨迹单一产生的磨削痕迹,采用直角坐标和极坐标两种加工轨迹,并且不断调整加工进给步长^[6]。加工中镜面在磨盘压力作用下产生变形,对加工结果产生影响,采用镜体背部放置软性材料,减小磨头压力的方法减小这种影响。下面重点讨论镜面变形对加工结果产生的影响。

2.3.1 镜面变形对加工结果影响

数次抛光后,利用 $600\ \text{mm}$ 口径平面干涉仪进行干涉检验,发现镜面面形误差分布出现有规则的、与反射镜体背部轻量化结构(如图 1(a)所示)有关的面形分布(如图 1(b)所示)。这是由于镜面在磨盘压力作用下产生弹性变形,镜面产生类似“弹性让刀”的现象,称之为网格效应。对应背部远离筋的镜面区域,由于磨盘压力产生变形较大,与磨盘的压力较小,因而材料去除小。加工后会发现这个区域为高带;同理,对应筋的镜面区域,由于在磨盘压力作用下变形较小的,磨盘对镜面的压力较大,会出现低带。在面形误差的结果中,由于网格效应产生的高点与低点 $P-V$ 达到 0.30λ ($\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$),这种有规律的中低频误差分布,会影响系统的成像质量^[7]。

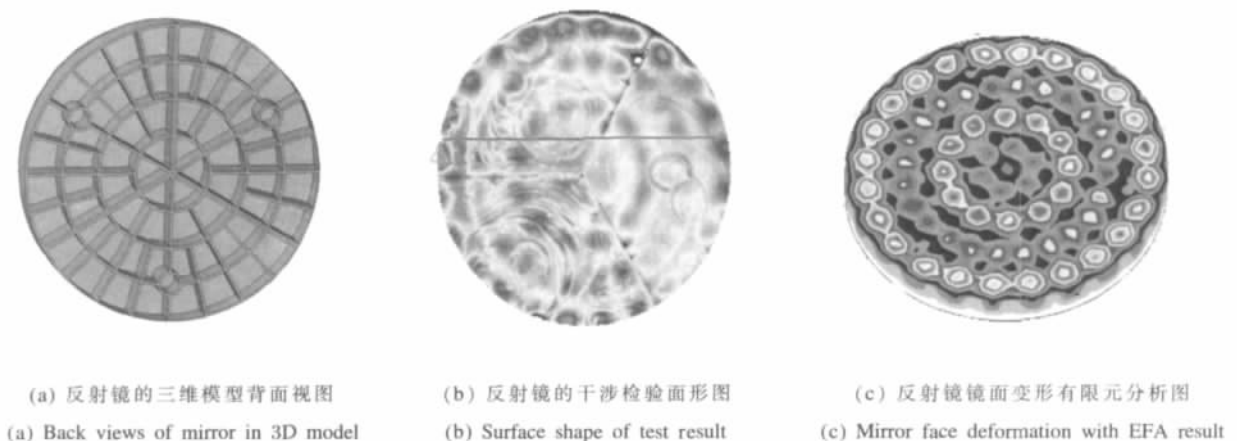


图 1 抛光结果与镜面变形对照图

Fig.1 Comparison of polishing results with mirror face deformation

2.3.2 有限元分析网格效应的产生

利用 Patran 应用软件,对加工变形进行了三维有限元分析。镜体的表面及外环采用块单元,内部轻量化结构采用板壳单元。将镜体几何模型划分为 4 万个高次四面体体积单元和 7 万个节点,以提高计算精度。材料弹性模量为 410 MPa,泊松比为 0.16。为了模拟镜面加工后的状态,对镜坯底面施加约束,限制 3 个位移和 3 个旋转自由度,在整个镜面均匀施加加工中磨盘对镜面的压强,对整个镜面的变形进行有限元分析,如图 1(c)所示,镜面的最大变形量分别为 0.21 μm,同时发现镜面与镜体背部结构产生了对应的镜面变形分布。由于初始误差的存在,实际加工过程中整个镜面受到不均匀的压力,笔者不能模拟得到与图 1(c)所示完全一致的分布图形。

Vukobratovich 通过有限元分析^[8],得到了轻量化反射镜镜面最大变形的公式:

$$\delta_{\text{Quilting}} = \frac{12\lambda p B^4 (1-\nu^2)}{Et_f^3} \quad (1)$$

式中: t_f 为镜面厚度; p 为施加压力; B 为轻量化网格的内切圆直径; λ 为轻量化形状常量。

从公式(1)可以看出:反射镜面在均匀压强下的最大变形量 δ_{Quilting} 与反射镜面的压强 p 成正比,与轻量化网格内切圆直径 B 的四次方成正比,与镜面厚度 t_f 的三次方成反比,反射镜的结构对网格效应产生影响很大。增加反射镜的镜面厚度和减小轻量化网格内切圆直径 B (即增加网格的密度或增加筋的厚度)都会增加反射镜的质量,影响反射镜的轻量化率。需要在两者之间平衡,一般情况下反射镜镜面厚度应该大于 4 mm,筋的厚度应该大于 2 mm。在加工过程中,减小磨头压力会减小镜面的最大变形,但又会影响加工效率。

实验发现:(1)在镜面所受压强大小相同的条件下,直径较大的磨盘更容易产生网格效应。(2)采用小磨头加工的过程中,采用直角坐标和极坐标交替使用,同时改变进给方式和加工间隔的办法有助于减少网格效应的产生。

3 焊缝边缘材料的优先去除

干涉检测面形误差发现,在反射镜的焊缝边缘处出现了低带,即加工过程中焊缝边缘附近产生了材料的优先去除。如图 2 所示,随着焊缝宽度增加,优先去除深度

增加。反射镜镜面中间区域焊缝宽度大约为 10 μm,优先去除深度为 0.3 μm 左右,在反射镜边缘区域焊缝宽度约为 20 μm,优先去除深度为 0.5 μm 左右。

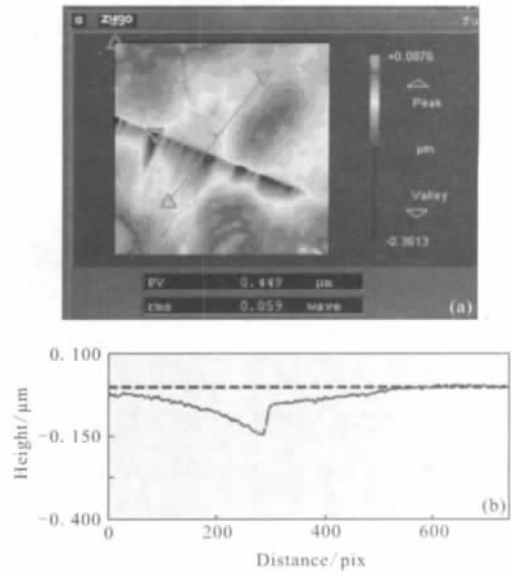


图 2 焊缝边缘干涉检验结果

Fig.2 Preferential removal of material near brazing line

进一步观察发现,不但焊料被优先去除,焊缝边缘的 SiC 材料也产生优先去除。这是因为,在开始阶段,由于焊料的硬度小于 SiC 硬度,焊料被优先去除,然后磨料在焊缝处聚集,形成楔形缝隙,在磨盘运动带动下,从宽缝向细缝运动挤压,形成对焊缝边缘 SiC 材料的大量去除^[9]。这种原理与在抛光盘工作面刻划出规则网格类似,用来增加加工过程中材料的去除效率。

在加工过程中由于焊接 SiC 反射镜焊缝的存在,产生焊料及焊缝边缘优先去除的现象。使用 500×显微镜观察测量抛光后的焊缝处,发现焊缝宽度为 8~20 μm(见图 3),经过计算,全部焊缝面积占反射镜面面积不到 0.3%。

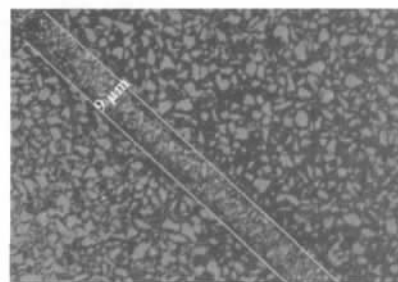


图 3 抛光后焊缝边缘放大照片

Fig.3 Microscope photo of near the brazing area after polishing

4 检测实验

为了检验焊接反射镜是否会由于支撑和重力作用产生镜面变形,进行如下实验。抛光后的干涉检测阶段,采用一种类似 V 形块的两杆支撑结构将反射镜支撑固定,两支点与镜面中心连线的夹角为 110° 。在加工过程中,为了使干涉检验的坐标与数控加工中心所选用的坐标对应,将反射镜作上标记,方便每次加工和检测复位,以同一个角度进行干涉检测。采用小磨头加工的方法(CCOS 技术)在数控光学加工中心加工,面形误差收敛到均方根值 0.070λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$)。分别进行吊带、 0° 、 90° 、 180° 和 270° 不同支撑方式的检测。对比结果发现,各个支撑方式得到的检测结果的面形误差均方根值变化小于 0.005λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$)。

5 结论

对 600 mm 口径焊接 SiC 反射镜进行加工,最终面形收敛到 RMS 值 $1/20\lambda$ ($\lambda=632.8\ \text{nm}$) (见图 4),各个支撑状态面形变化均方值小于 $1/200\lambda$ ($\lambda=632.8\ \text{nm}$),焊缝占整个工件表面的面积小于 0.3%。通过测试证明了所采用的焊接方法能满足空间用大口径反射镜的需要,为更大口径焊接 SiC 反射镜的加工和检测奠定了基础。

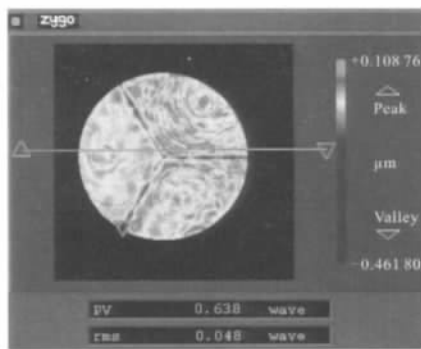


图 4 最终干涉测量结果

Fig.4 Final testing result of the brazed mirror

参考文献:

[1] Zhang Changrui, Zhou Xingui. The development of lightweight

optics made of SiC and SiC matrix composites [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(2): 14-19. (in Chinese)

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.

[2] Tsuno Katsuhiko, Irikadoa Hiroshi, Oonoa Kazuhiko, et al. New technology silicon carbide demonstration of new material for large light weight optical mirrior[C]//SPIE, 2005, 5659: 138-145.

[3] Han Jiecai, Zhang Yumin, He Xiaodong. Optical large scale lightweight SiC mirrors [J]. *Journal of Astronautics*, 2001, 22(6): 124-132. (in Chinese)

韩杰才, 张宇民, 赫晓东. 大尺寸轻型 SiC 光学反射镜研究进展 [J]. 宇航材料, 2001, 22(6): 124-132.

[4] Mark A E, Gerald Q W. Developmental history and trends for reaction bonded silicon carbide mirrors [C]//SPIE, 1996, 2857: 66-72.

[5] Michael Bougoin, Pierre Deny. The SiC technology is ready for the next generation of extremely large telescopes [C]//SPIE, 2004, 5494: 9-18.

[6] Niu Haiyan, Zhang Xuejun. Research on computer controlled polishing technology of 124mm aspheric reaction-bonded silicon carbide Mirror [J]. *Opt Precision Eng*, 2006, 14(4): 539-544. (in Chinese)

牛海燕, 张学军. 124 mm 口径 SiC 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.

[7] Fan Bin, Zeng Zhige, Li Xiaojin, et al. Fine grinding technology of active lap for large aspherics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 873-876. (in Chinese)

范斌, 曾志革, 李晓今, 等. 大型非球面能动磨盘精磨技术 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 873-876

[8] Zhang Xuejun, Zhang Yunfeng, Yu Jingchi, et al. FSGJ-1 system of asphere automaking and on-line testing [J]. *Opt Precision Eng*, 1997, 5(2): 70-76. (in Chinese)

张学军, 张云峰, 余景池, 等. FSGJ-1 非球面自动加工及在线检测系统 [J]. 光学精密工程, 1997, 5(2): 70-76.

[9] Wu Xiaojing, Meng Junhe. Athermalizing infrared optical systems by using simple mechanical framework [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 391-393. (in Chinese)

吴晓靖, 孟军和. 使用简单机械结构实现红外光学系统无热化 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 391-393.