

大口径离轴碳化硅非球面反射镜加工与检测技术研究

王孝坤

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 分析了碳化硅作为空间反射镜材料的各种优点,研究了加工和检测离轴碳化硅非球面反射镜的各项关键技术。利用自行开发的非球面加工中心 FSGJ-2 对离轴碳化硅非球面进行了研磨、抛光和轮廓测量,分析了计算全息补偿检测离轴非球面的基本原理,并专门设计研制了计算全息衍射检测装置,对大口径离轴非球面反射镜进行了零位补偿干涉测量。结合工程实例对一口径为 468 mm×296 mm 的离轴碳化硅非球面进行了超精加工与检测,最终面形误差峰谷(PV)值为 0.148λ,均方根(RMS)值为 0.017λ(λ=632.8 nm),达到了良好的效果。

关键词 光学设计;碳化硅;非球面反射镜;离轴非球面;计算机控制光学表面成形;计算全息

中图分类号 TQ171.65;O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.011201

Fabrication and Testing of Large Aperture Off-Axis SiC Aspheric Mirror

Wang Xiaokun

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract The advantage of manufacturing space mirror by SiC material is analyzed, and the key technologies of fabricating and testing SiC aspheric mirror are researched. The off-axis SiC aspheric surface is ground and polished by the FSGJ-2 numerical control machine, and the contour is measured by the profilometer of FSGJ-2. For the purpose of testing aspheric mirror by null-compensation, a computer-generated holographic instrument is specifically designed and developed. Finally, an example for fabricating and measuring an off-axis aspheric mirror with the aperture of 468 mm×296 mm is given. The peak-to-valley (PV) and root mean square (RMS) values of the surface error are 0.148λ and 0.017λ (λ is 632.8 nm), respectively. It could meet the requirements of the optical design.

Key words optical design; SiC; aspheric mirror; off-axis asphere; computer control optical surface; computer-generated holograph

OCIS codes 120.4610; 120.2880; 120.6650

1 引言

在光学系统中采用非球面光学元件,不仅可以降低系统的复杂程度,而且可以大幅度提高系统性能。因此,非球面光学元件是军用、民用高性能光学系统的核心元器件,在航空航天遥感、天文观测、深空探测和光电跟踪仪器、光刻物镜及高性能照相(摄像)机镜头等诸多光电仪器领域具有广泛的应用^[1~4]。

反射镜是空间相机系统中的关键部件,为了保证空间反射镜在应用期间的稳定性和可靠性,要求反射镜的材料具有密度低、比刚度高、热膨胀系数小、导热性能良好、抗辐照能力强等特性^[5~8]。此外,反射镜材料还要具有较好的机械和光学加工性能,可获得所需要的形状和表面粗糙度。

目前大型光学遥感系统中使用的反射镜镜体材料主要有 ULE、Zerodur、铍(Be)和碳化硅(SiC)等。为了降低发射重量、保持镜面面形,空间用轻型反射镜必须高度轻量化并具有良好的热稳定性^[7,9,10]。通过分析对比可以得出, SiC 的比刚度和热稳定性都相对较高,与其他传统材料相比,是一种非常理想的太空材料。

收稿日期: 2011-07-16; 收到修改稿日期: 2011-08-30; 网络出版日期: 2011-10-21

基金项目: 国家 863 计划(O8663NJ090)和国家自然科学基金重点项目(61036015)资助课题。

作者简介: 王孝坤(1980—),男,博士,副研究员,主要从事光学超精加工和检测技术等方面的研究。

E-mail: jimwxx@sohu.com

因此, SiC 材料正越来越多地用于空间相机反射镜体的制备中, SiC 反射镜的制造技术也成为国内外的研究热点。本文针对 SiC 离轴非球面反射镜的加工和检测技术进行研究, 并结合工程实践制造了性能优异的 SiC 反射镜。

2 碳化硅非球面精密加工与检测技术

为了实现对碳化硅非球面反射镜的加工, 自行研制了 FSGJ-2 非球面数控加工中心, 它是一台建立在计算机控制光学表面(CCOS)成形技术基础上, 集研磨、研磨阶段的在线检测以及抛光于一体的非球面自动制造机床, 其加工非球面的最大尺寸为 1000 mm。

图 1 为 FSGJ-2 非球面数控加工中心实物图, 其主体采用龙门式结构, 基座和龙门均采用花岗岩材料。磨头是依靠气缸内的气压来与工件接触的, 可以通过调节气缸内气体的压强来改变磨头与工件间的相对压力^[11,12]。

为了满足不同的加工要求, FSGJ-2 非球面数控光学加工中心采用了 6 自由度联动数控系统, 分别表示为 X、Y、Z、U、V、W, 其中 X、Y、Z 为平动自由度, U、V、W 为转动自由度。工作台可以沿着 X 方向来回移动, 并可以绕台中心旋转(U 轴)。测头和磨头集成在连接板上, 可实现沿 Y 方向和 Z 方向的移动。磨头可以沿 W 方向转动, 同时也能沿 V 方向摆动。通过调节磨头主轴的偏心距, 当磨头沿 W 方向转动时, 便可实现磨头的摆动式变速平转动运动。

磨头在 V 方向可以进行 $\pm 60^\circ$ 的摆动, 使小磨头总是能够以非球面表面法线方向为轴转动, 磨头压力方向与法线方向一致, 适合于加工陡度较大的非球面。该加工中心的这些运动功能确保了离轴非球面的研磨、研磨阶段的在线检测以及抛光能顺利实现。

具体的加工流程如图 2 所示。首先需要对非球面进行铣磨成型加工, 在精密成型阶段将采用 DMG 数控加工中心利用超声技术铣磨。铣磨后的表面属于机械加工表面, 加工后使用 FSGJ-2 加工中心中的高精度轮廓测量仪对表面进行检测, 其检测结果用于修正数控加工模型。其次, 利用 FSGJ-2 加工中心采用 CCOS 技术对非球面进行研磨和粗抛光, 由于 SiC 材料硬度特别大, 因此选用不同粒度的金刚石微粉对其进行研磨和粗抛光, 利用轮廓测量仪对其表面进行测量, 直至面形峰谷(PV)值小于 $2 \mu\text{m}$ 。然后, 利用计算机控制沥青盘采用粒度为 $1.5 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 的金刚石微粉对非球面进行精抛光, 利用计算全息(CGH)补偿技术对其面形进行检验, 直至面形均方根(RMS)值满足设计要求。



图 1 FSGJ-2 非球面数控加工中心

Fig. 1 FSGJ-2 computer controlled machine for manufacturing aspheric surface

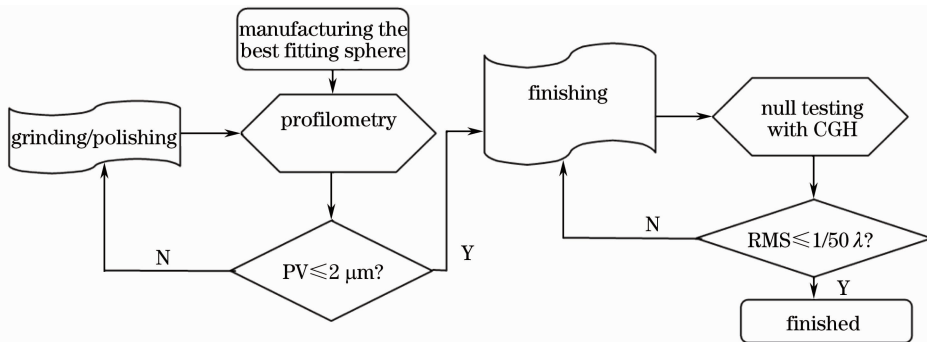


图 2 非球面加工流程图

Fig. 2 Flow chart of manufacturing aspheric surfaces

3 加工检测实验

结合工程实例对一口径为 $468 \text{ mm} \times 296 \text{ mm}$ 的离轴碳化硅非球面进行了超精加工与检测。该非球面

为离轴双曲面,其中二次曲面常数为 -2.18 ,离轴量为 25.3 mm ,顶点曲率半径为 2568.34 mm ,轻量化率达到了 70% 。

首先对非球面元件进行数控研磨,利用高精度轮廓检测系统对其表面进行接触式测量,当其面形峰谷值小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 后,对其表面进行抛光。

为了实现对非球面抛光阶段的检测,采用CGH衍射元件进行零位补偿测量。利用CGH补偿测量非球面的原理如图3所示。干涉仪出射的球面波经过CGH衍射后转换为非球面波并与被检非球面的理论形状重合,因此所有光线都垂直入射到被检非球面上,并沿原路返回与参考波面形成干涉条纹,从而获得被检非球面的面形误差分布^[13]。检测时CGH被置于干涉仪的焦前,为

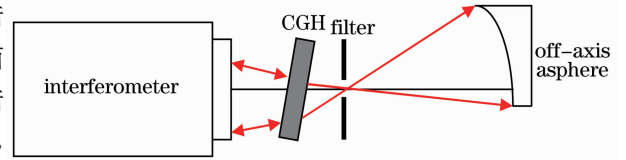


图3 CGH补偿检测非球面原理图

Fig. 3 Sketch map of testing asphere by CGH

为了避免基板表面返回鬼像,选择倾斜载频方式,对CGH基板引入一定的倾斜;为了滤掉有效衍射级次以外的其他衍射级,在适当位置使用小孔滤波将 $+1$ 级和 -1 级之外的其他衍射级次滤去^[14,15]。

为该非球面反射镜专门设计了CGH,对其进行了零位补偿干涉测量。CGH的设计结果和实物图如图4所示,其设计与制作精度优于 $\lambda/100(\text{RMS})$,满足精度要求。

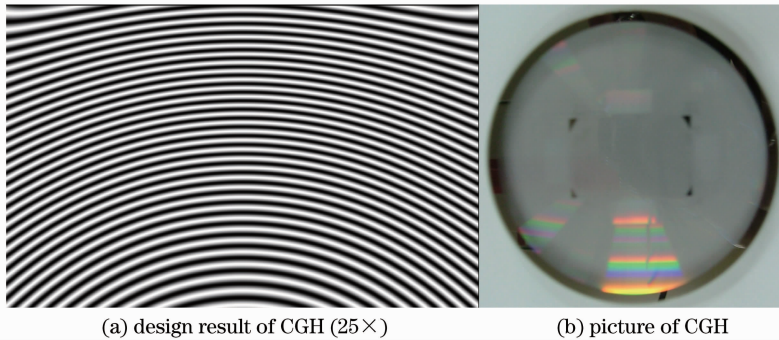


图4 CGH设计结果及实物图

Fig. 4 Design result and picture of CGH

CGH是以光刻方法在平行玻璃基板上生成衍射图案形成的衍射光学元件,它包含三个功能衍射区域。第一个区域为主区域,它的功能是将入射波前衍射为理想非球面波,并在非球面波携带面形信息返回时作相应的逆变换,完成CGH的主要检测功能;第二个为对准区域,其功能是将入射波前在CGH处原路返回,实现CGH自身与干涉仪之间的对准;第三个为基准区域,其功能为在被检面处投射多个衍射图样,如十字线或直线段,作为被检面在检测光路中位置调整时的定位基准。

实现检测光路对准后,需要对反射镜顶点曲率半径和离轴量进行几何量测量,主要采用激光跟踪仪进行。图5为激光跟踪测量方法示意图。

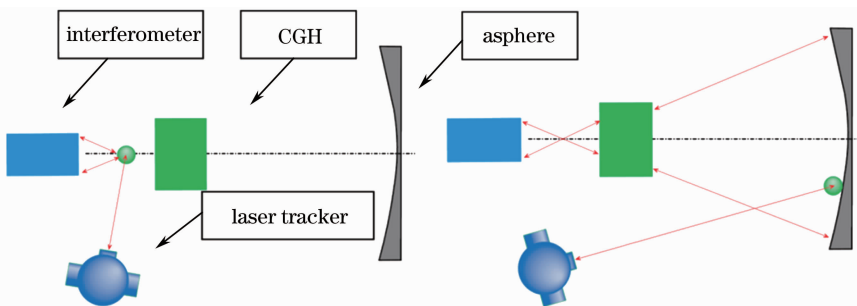


图5 激光跟踪仪检测曲率半径示意图

Fig. 5 Sketch map of testing radius of curvature of asphere by laser tracker

激光跟踪仪检测曲率半径的方法属于间接测量法,先在三维测量软件中建立测量模型,在测量 CGH 元件特征点后,再测量反射镜上的特征点和镜面上若干点,在模型中获得曲率半径和离心量偏差,最终获得曲率半径和离轴量测量值。

CGH 补偿干涉检验非球面设备图如图 6 所示,检测结果如图 7 所示,测量得到非球面面形的 PV 值为 0.148λ ,RMS 值为 0.017λ ,满足设计要求。

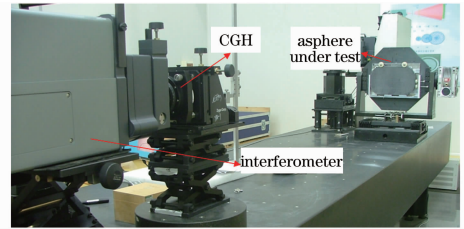


图 6 CGH 补偿检测非球面设备装置图
Fig. 6 Setup of testing asphere by CGH

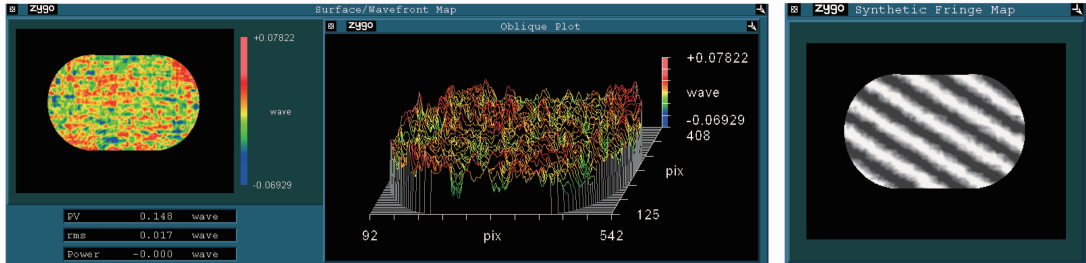


图 7 CGH 补偿检测非球面面形图和干涉图
Fig. 7 Phase map and interferogram of testing results

4 结 论

在分析空间反射镜材料需求特性和对比各种反射镜材料优缺点的基础上,提出利用 SiC 材料制备大尺寸非球面反射镜的技术。利用自行开发的 FSGJ-2 数控加工中心采用 CCOS 技术对 SiC 非球面进行了研磨、抛光和轮廓测量,并专门设计研制了 CGH 元件,对非球面进行了零位补偿干涉测量。结合实例对一口径为 $468\text{ mm} \times 296\text{ mm}$ 的离轴碳化硅非球面反射镜进行了超精加工与检测,最终面形 RMS 值为 0.017λ ,满足了设计要求。

参 考 文 献

- 1 D. Malacara. Optical Shop Testing[M]. New York: Wiley, 1992
- 2 Roger B. Huxford. Wide FOV head mounted display using hybrid optics[C]. *SPIE*, 2004, **5249**: 230~237
- 3 Zhang Xuejun. Manufacturing of a three mirror anastigmat telescope[C]. *SPIE*, 2003, **4829**: 884~885
- 4 Jun Chang, Yongtian Wang, Tingcheng Zhang *et al.*. All reflective zoom systems for infrared optics[C]. *SPIE*, 2006, **6342**: 63421Q
- 5 J. Robichaud, J. Schwartz, D. Landry *et al.*. Recent advances in reaction bonded silicon carbide optics and optical systems [C]. *SPIE*, 2005, **5868**: 586802
- 6 S. Williams, P. Deny. Overview of the production of sintered SiC optics and optical sub-assemblies[C]. *SPIE*, 2005, **5868**: 586804
- 7 M. Bougoin, P. Deny. The SiC technology is ready for the next generation of extremely large telescopes[C]. *SPIE*, 2004, **5494**: 9~18
- 8 Zhang Ge. The Study on Fabrication Technique of Large-Scale Silicon Carbide Mirror Blank[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008
张 舸. 大尺寸碳化硅质反射镜镜体制备技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2008
- 9 Joseph Robichaud, James J. Guregian, Mark Schwalm. SiC optics for earth observing applications[C]. *SPIE*, 2003, **5151**: 53~62
- 10 Xu Lingdi. Study of Surface Polishing Technique and the Properties of Coated RB-SiC Mirrors[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009
徐领娣. 改性 RB-SiC 反射镜的抛光工艺及性能研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2009
- 11 Zhang Feng. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(12): 2557~2563

- 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
- 12 Zhang Xuejun, Zhang Zhongyu, Li zhilai. Manufacturing and testing of 1-m class SiC aspherical mirror[C]. *SPIE*, 2007, **6721**: 672109
- 13 Li Fazhi, Luo Xiao, Zhao Jingli *et al.*. Test of off-axis aspheric surfaces with CGH[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(4): 709~716
- 黎发志, 罗 霄, 赵晶丽 等. 离轴非球面的计算全息图高精度检测技术[J]. 光学 精密工程, 2011, **19**(4): 709~716
- 14 Hua Liu, Zhenwu Lu, Fengyou Li. Redistribution of output weighting coefficients for complex multiplexed phase-diffractive elements[J]. *Opt. Express*, 2005, **12**(19): 4348~4352
- 15 Jae Bong Song, Yun Woo Lee. Optical test for the primary mirror of a space telescope using a CGH null lens[C]. *SPIE*, 2006, **6034**: 60341M