

空间相机碳化硅反射镜表面硅改性层的组合式抛光

张 峰

(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中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 为实现空间碳化硅反射镜表面硅改性层的精密抛光,提出了由计算机数控抛光、柔性化学机械抛光和离子束抛光这三种抛光技术相结合的组合式加工方法。分别介绍了三种抛光技术的抛光原理、抛光设备、抛光实验以及各自在组合加工中所起到的作用。计算机数控抛光可在一定程度上提高反射镜表面硅改性层的面形精度并降低其表面粗糙度。柔性化学机械抛光可以进一步改善反射镜表面硅改性层的表面粗糙度和光洁度。离子束抛光用以最终提高反射镜的面形精度。采用组合式加工方法对表面改性空间相机碳化硅平面反射镜进行了抛光。抛光后,空间碳化硅反射镜的面形精度均方根值达到 0.014λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$),表面粗糙度的均方根值达到 $0.71\ \text{nm}$ 。

关键词 光学制造; 计算机控制表面成型; 柔性化学机械抛光; 离子束抛光

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0716001

Combined Type Polishing of Silicon Modification Layer on Silicon Carbide Mirror for Space Camera

Zhang Feng

(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 To actualize precise polishing of silicon modification layer on space silicon carbide mirror, combined type polishing technology, consisting of computer-controlled optical surfacing (CCOS), flexible chemical mechanical polishing (FCMP) and ion beam figuring (IBF), is presented. The polishing principles, polishing machines, polishing experiments and polishing functions of three type polishing technologies are introduced, respectively. To improve figure accuracy and reduce surface roughness of silicon modification layer in a way, computer-controlled optical surfacing technology is adopted. The surface roughness and surface finish of silicon modification layer are improved further by flexible chemical mechanical polishing technology. The high figure accuracy of silicon modification layer is achieved finally by ion beam figuring technology. The surface modification silicon carbide plane mirror for space camera is polished by the combined type polishing technology. After polished, root mean square values of the figure and roughness of the space silicon carbide mirror are 0.014λ ($\lambda = 0.6328\ \mu\text{m}$) and $0.71\ \text{nm}$, respectively.

Key words optical fabrication; computer-controlled surfacing; flexible chemical mechanical polishing; ion beam figuring

OCIS codes 220.4610; 220.1250; 220.4840; 240.5450

1 引 言

碳化硅材料具有优良的物理性质和高度稳定的化学性质,目前已取代玻璃材料成为空间相机反射镜镜体的主流材料^[1-5]。然而,碳化硅也有自身的不足之处:它是一种陶瓷材料,表面存在如残留气孔等缺陷,直接对碳化硅抛光很难获得满足空间反射镜精度要求的高质量光学表面。一般先将碳化硅反

射镜基底加工到一定的面形精度,其均方根(RMS)通常为 0.1λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$)左右。然后在碳化硅反射镜表面镀制一层硅或碳化硅,对其表面进行改性^[6-10]。最后,通过对碳化硅表面改性层的加工得到高质量光学表面^[11-12]。

随着对空间相机分辨率等技术指标要求越来越高,相应地要求空间相机反射镜的尺寸越来越大、面

收稿日期: 2013-02-01; 收到修改稿日期: 2013-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61036015)

作者简介: 张 峰(1969—),男,博士,研究员,主要从事光学加工与检测方面的研究。E-mail: zhangfjy@yahoo.com.cn

形精度和表面质量越来越高。同时,碳化硅表面改性层具有其自身特性^[13]。单一的光学加工方法很难加工出同时满足各项技术指标要求的空间碳化硅反射镜。通过深入研究发现,采用计算机数控抛光、柔性化学机械抛光以及离子束抛光方法对空间相机碳化硅反射镜表面硅改性层进行组合式加工,可以满足反射镜面形精度、表面粗糙度和光洁度等指标要求。计算机数控抛光可在一定程度上提高反射镜表面硅改性层的面形精度、降低其表面粗糙度、提高其表面光洁度;柔性抛光可在保持反射镜面形精度基本不变的情况下,进一步改善其表面粗糙度和光洁度;离子束抛光最终提高反射镜的面形精度。

2 碳化硅表面改性层计算机数控抛光

空间相机反射镜的面形一般有平面、球面、非球面乃至自由曲面。因此,空间相机碳化硅反射镜基底的研磨和抛光以及改性后碳化硅反射镜表面硅改性层的粗抛光是通用的非球面数控加工中心采用计算机控制光学表面成型技术(CCOS)进行的。CCOS的加工原理是以定量的检测数据为依据,通过计算机控制运动着的磨头在工件表面不同位置的驻留时间,来实现对工件表面面形的修正。

图1为非球面数控加工中心,其床身采用龙门式结构,基座和龙门立柱均采用稳定的花岗岩材料。采用6个自由度联动数控系统,分别用X、Y、Z、U、V、W表示。其中X、Y、Z为平动自由度,分别表示工作台在X轴方向的平移、磨头在Y轴方向的平移和在Z轴方向的升降;U、V、W为转动自由度,分别表示工作台转动、磨头的摆动和转动。磨头是依靠

气缸内的气压来与工件接触的;可以通过调节气压来改变磨头与工件间的相对压力。在加工过程中6个自由度相互配合使用确保了非球面碳化硅反射镜的研磨和抛光的顺利实现。



图1 非球面数控加工中心

Fig.1 Computer-controlled machine for aspheric surface

在非球面数控加工中心上,首先将碳化硅反射镜基底加工到一定的面形精度,RMS通常为 0.1λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$)左右。然后,采用离子束辅助沉积(IBAD)的改性技术来对碳化硅反射镜表面进行改性,改性后碳化硅反射镜的面形精度基本保持不变。最后利用非球面数控加工中心对碳化硅反射镜表面硅改性层进行粗抛光,使反射镜表面达到下道工序所需要的面形精度和表面粗糙度。

在非球面数控加工中心,对面形精度的RMS约为 0.1λ 的 $\Phi 140\ \text{mm}$ 表面改性碳化硅样片进行数控抛光。经过多个周期的抛光,最终获得如图2所示的面形精度和如图3所示的表面粗糙度,样片的面形精度的RMS为 $16.45\ \text{nm}$ (约为 0.026λ),表面粗糙度的RMS为 $1.09\ \text{nm}$ 。

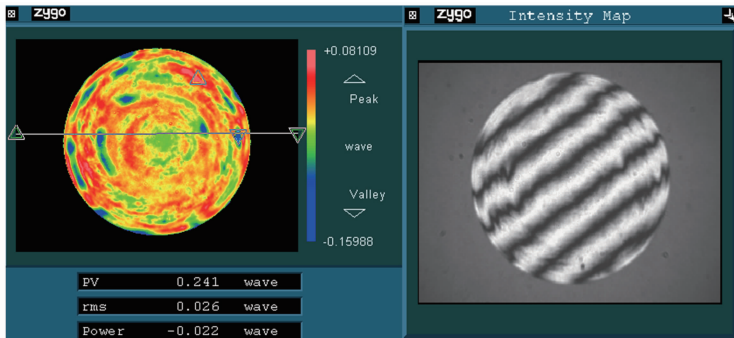


图2 数控抛光后碳化硅改性样片的面形精度

Fig.2 Surface accuracy of modified SiC sample after CCOS

数控加工不可避免地会在样片表面产生波纹度误差,主要通过控制数控加工过程中的工艺参数来抑制和淡化这些波纹度误差。经研究发现抛光盘的尺寸和硬度是影响波纹度误差的两个重要工艺参数,

尺寸较大、硬度较高的抛光盘有利于修正波纹度误差。因此,在数控抛光不同加工周期,通过更换不同尺寸和硬度的抛光盘,在修正样片面形误差的同时修正其表面波纹度误差。同时,在不同加工周期,通

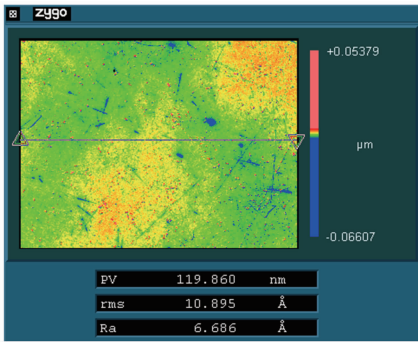


图3 数控抛光后碳化硅改性样片的表面粗糙度

Fig. 3 Surface roughness of modified SiC sample after CCOS

过改变抛光盘的运动轨迹、进给间距、压力等参数来均化样片表面的波纹度。从图2所示的干涉图中可以看到,样片面形误差加工到一定精度时,其表面波纹度误差也得到了有效的修正。

3 碳化硅表面改性层的柔性化学机械抛光

高精度空间相机反射镜面形精度的RMS一般应优于 0.02λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$),表面粗糙度的RMS应低于1 nm,同时表面光洁度较高。在非球面数控加工中心上,利用氧化铈(CeO_2)抛光液对碳化硅反射镜表面硅改性层进行粗抛光,虽然能在一定程度上提高反射镜表面硅改性层的面形精度、降低其表面粗糙度以及改善其表面光洁度,但是还不能满足空间相机反射镜所需要的高质量光学表面的要求。为了进一步改善其表面粗糙度、提高其表面光洁度,用有机溶剂基纳米级二氧化硅(SiO_2)抛光液代替 CeO_2 抛光液,用质地细腻的柔性抛光革代替硬度较大的沥青抛光盘,对碳化硅反射镜表面硅改性层进行柔性化学机械抛光(CMP)。

化学机械抛光技术最早见于1965年的一个美国专利^[14]。目前,CMP技术最广泛的应用是在集成电路中对基体材料硅晶片的抛光。CMP是在化学抛光和机械抛光综合作用下完成的,是一个复杂的物理化学过程。碳化硅反射镜表面硅改性层的柔性化学机械抛光原理是:在有机溶剂基纳米级 SiO_2 抛光液的作用下,碱性抛光液与硅改性层表面反应生成硅酸,并进一步形成硅酸胶体覆盖在硅改性层表面,即称之为软质层的化学腐蚀层,其硬度要比硅改性层基体材料低。然后在柔性抛光盘的作用下,通过纳米二氧化硅磨料的机械抛光作用去除软质层。因此,柔性化学机械抛光就是一个在化学

腐蚀作用下不断形成软质层,然后在机械抛光作用下去除的过程。

对上述实验 $\Phi 140\ \text{mm}$ 表面改性碳化硅样片进行柔性化学机械抛光。加工条件如下:实验室温度为 $(22\pm 0.5)\ ^\circ\text{C}$,抛光头直径为50 mm,抛光模采用柔性抛光革,抛光头采用平摆动运动方式,偏心距为10 mm,抛光头压力为0.2 MPa,抛光轴转速为200 r/min,抛光模式为整个表面均匀抛光,抛光时间为75 min。抛光后表面改性碳化硅样片面形基本没有改变,表面粗糙度如图4所示,RMS为0.61 nm。经检测,柔性抛光后样片的表面光洁度和粗糙度均满足高精度空间相机反射镜所需的技术指标要求。

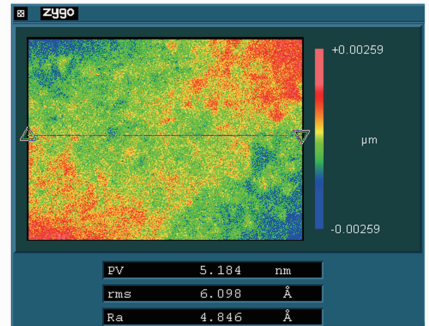


图4 柔性化学机械抛光后碳化硅改性样片的表面粗糙度

Fig. 4 Surface roughness of modified SiC sample after flexible CMP

4 碳化硅表面改性层的离子束抛光

采用柔性抛光技术使碳化硅反射镜表面硅改性层的表面粗糙度和光洁度满足要求。为了进一步提高表面改性碳化硅反射镜的面形精度,还需对其进行离子束抛光(IBF)。离子束加工方法的原理是:在真空条件下,离子源发射的高能离子束轰击工件表面,利用轰击时发生的物理溅射效应去除工件表面材料^[15]。离子束抛光设备如图5所示。

要采用离子束抛光方法进行光学加工,首先要

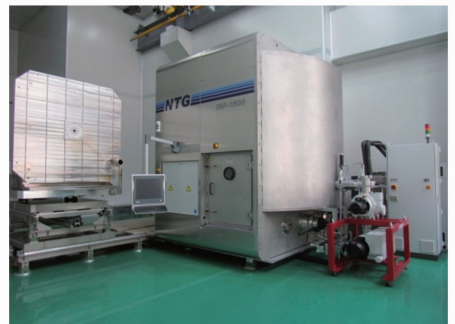


图5 离子束抛光设备

Fig. 5 Ion beam polishing equipment

知道这种抛光方法的去除函数。这里通过对抛光实验中材料去除结果的分析,得出准确的、稳定的去除函数。利用离子束抛光设备对表面改性碳化硅样件进行抛光实验。实验条件如下:实验件为 $\Phi 70$ mm 表面改性碳化硅样片;氩气流量为 4 mL/min;射频(RF)电路功率为 50 W;离子束电压为 1000 V,电流为 1.45 mA;加速器电压为 100 V,电流为 0.22 mA;中和电流为 50 mA。经过 100 s 离子束抛光,加工结果如图 6 所示。

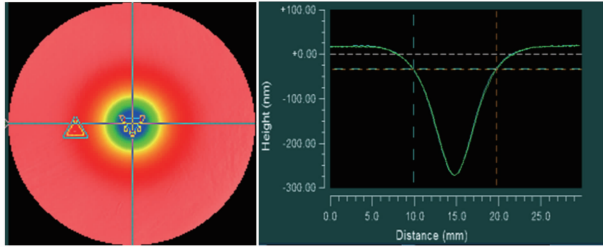


图 6 离子束抛光去除结果

Fig. 6 Footprint result of ion beam polishing

从图 6 可以得出,在上述实验条件下,离子束抛光碳化硅反射镜表面硅改性层的峰值去除率为 2.946 nm/s,体积去除率为 0.008339 mm³/min,离子束的半峰全宽约为 5.85 mm。经过多次抛光发现离子束抛光去除函数的不稳定性小于 3%。

以上述抛光获得的离子束抛光去除函数为依据,在相同的加工条件下,对前文提及的经过柔性化学机械抛光的 $\Phi 140$ mm 表面改性碳化硅样片进行离子束抛光。经过 1.5 h 的抛光,其面形精度如图 7 所示。表面改性碳化硅样片面形精度的 RMS 达到 1.155 nm(约为 0.002 λ),完全满足空间相机反射镜所需的面形精度要求。

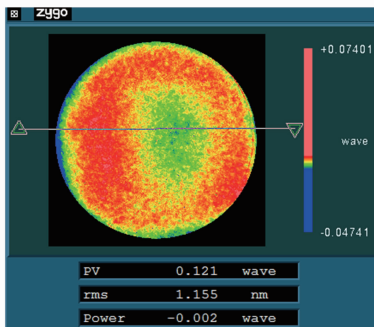


图 7 离子束抛光结果

Fig. 7 Result of ion beam polishing

5 组合抛光实例

按照上面研究得出的工艺规范,采用计算机数控抛光、柔性化学机械抛光以及离子束抛光组合加

工方法对尺寸为 600 mm \times 200 mm 的空间相机表面改性碳化硅平面反射镜进行实际抛光。反射镜的实物照片如图 8 所示。



图 8 空间反射镜的实物照片

Fig. 8 Photo of space mirror

采用计算机数控抛光方法对空间相机表面改性碳化硅平面反射镜进行抛光,经过多个周期的迭代抛光,检测结果如图 9 所示。反射镜的面形精度的 RMS 为 0.046 λ ,表面粗糙度的 RMS 为 1.64 nm。

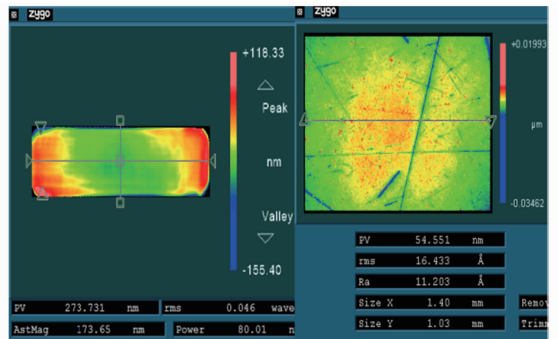


图 9 反射镜数控抛光后检测结果

Fig. 9 Test result of mirror after CCOS

采用柔性化学机械抛光和离子束抛光方法,分别对空间相机表面改性碳化硅平面反射镜抛光 16 h 和 7.5 h,最终的检测结果如图 10 所示。反射镜的面形精度的 RMS 为 0.014 λ ,表面粗糙度的 RMS 为 0.71 nm。空间相机表面改性碳化硅平面反射镜的各项指标均满足技术要求。

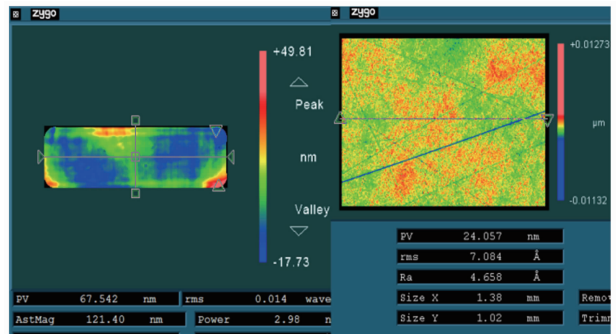


图 10 反射镜柔性化学机械抛光和离子束抛光后检测结果

Fig. 10 Test result of mirror after flexible CMP and IBF

6 结 论

通过对空间相机碳化硅反射镜表面硅改性层几种抛光方法的研究,得出适合空间相机碳化硅反射镜表面硅改性层抛光的最佳工艺方法,即采用计算机数控抛光、柔性化学机械抛光以及离子束抛光等方法对空间相机碳化硅反射镜表面硅改性层进行组合加工。采用这种组合式加工方法对尺寸为 $600\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的空间相机表面改性碳化硅平面反射镜进行工程应用抛光。最终的检测结果表明:反射镜面形精度的RMS为 0.014λ ,表面粗糙度的RMS为 0.71 nm ,满足高精度空间反射镜的技术指标要求。

参 考 文 献

- 1 M A Ealey, G Q Weaver. Development history and trends for reaction bonded silicon carbide mirrors[C]. SPIE, 1996, 2856: 66-72.
- 2 Gao Minghui, Liu Lei, Ren Jianyue. Characteristic test of SiC for space camera's mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1170-1174.
高明辉,刘磊,任建岳.空间相机反射镜碳化硅材料性能测试[J].光学精密工程,2007,15(8):1170-1174.
- 3 Zhang Jianhan, Zhang Yumin, Han Jiecai, *et al.*. Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(2): 179-184.
张剑寒,张宇民,韩杰才,等.空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试[J].光学精密工程,2006,14(2):179-184.
- 4 Zhang Ge, Zhao Rucheng, Zhao Wenxing. Fabrication and test of large scale light-weight SiC mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(5): 759-763.
张舸,赵汝成,赵文兴.大尺寸轻型碳化硅质镜体的制造与材料性能测试[J].光学精密工程,2006,14(5):759-763.
- 5 Zhang Ge, Zhao Rucheng, Zhao Wenxing. Study on fabrication technology of reaction bonded silicon carbide mirror blank for space[J]. Chinese J. Space Science, 2011, 31(3): 401-405.
张舸,赵汝成,赵文兴.空间用反应烧结碳化硅反射镜坯体制备技术研究[J].空间科学学报,2011,31(3):401-405.
- 6 S. G. Johnson. SiC coatings on RB SiC mirrors for ultra-smooth surfaces[C]. SPIE, 1993, 2018: 237-247.
- 7 Huidong Tang, Zhengren Huang, Shouhong Tan. PVD SiC and PVD Si coatings on RB SiC for surface modification[C]. SPIE, 2006, 6149: 61490A.
- 8 Liu Guiling, Huang Zhengren, Liu Xuejian, *et al.*. Recent developments of surface coatings and optical fabrication of silicon carbide[J]. J. Inorganic Materials, 2007, 22(5): 769-774.
刘桂玲,黄政仁,刘学建,等.碳化硅表面改性和光学镜面加工的研究现状[J].无机材料学报,2007,22(5):769-774.
- 9 Gao Jinsong, Shen Zhenfeng, Wang Xiaoyi, *et al.*. Research on surface modification of space used SiC mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2624-2629.
高劲松,申振峰,王笑夷,等.空间反射镜基底材料碳化硅表面改性研究[J].光学学报,2009,29(9):2624~2629.
- 10 Yuan Yongtao, Liu Hong, Shao Chuanbing, *et al.*. Preparation and performance of Si coating on RB-SiC mirror for surface modification[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(5): 1281-1284.
苑永涛,刘红,邵传兵,等. RB-SiC表面改性Si涂层的制备与性能[J].强激光与粒子束,2011,23(5):1281-1284.
- 11 Zhang Feng, Xu Lingdi, Fan Di, *et al.*. Fabrication of surface modification aspheric SiC mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2479-2484.
张峰,徐领娣,范镒,等.表面改性非球面碳化硅反射镜的加工[J].光学精密工程,2008,16(12):2479-2484.
- 12 Zhang Feng, Deng Weijie. Magnetic-medium assistant polishing of silicon modification layer on silicon carbide surface[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1116001.
张峰,邓伟杰.碳化硅表面硅改性层的磁介质辅助抛光[J].光学学报,2012,32(11):1116001
- 13 Zhang Feng, Fan Di, Gao Jingsong. Study on characteristics of silicon modification layer on silicon carbide surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 032202.
张峰,范镒,高劲松.碳化硅表面硅改性层的特性研究[J].激光与光电子学进展,2012,49(3):032202.
- 14 J Walshr, A H Herzog. Process for Polishing Semiconductor Materials[P]. US Patent 3170273, 1965-02-23.
- 15 Dai Yifan, Zhou Lin, Xie Xuhui, *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by ion beam[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1131-1135.
戴一帆,周林,谢旭辉,等.应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J].光学学报,2008,28(6):1131-1135.

栏目编辑: 韩 峰