

高体分铝基碳化硅表面镀镍钴合金非球面反射镜的光学加工

范 镛

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

摘要 为了制造具有良好力学和热学性能的反射镜,对高体分铝基碳化硅镀镍钴合金非球面反射镜的光学加工进行了研究;介绍了高体分铝基碳化硅 SiC_p/Al 的物理性能;采用不同抛光磨料和抛光模对 SiC_p/Al 镀镍钴合金样片进行抛光实验;在实验基础上,对 SiC_p/Al 表面镀镍钴合金同轴抛物面反射镜表面进行精密抛光,实现了 300 mm 口径 SiC_p/Al 表面镀镍钴合金同轴抛物面反射镜的光学加工,其面形精度均方根值为 0.027 λ (λ =632.8 nm),表面粗糙度 R_a 值优于 2.1 nm。

关键词 光学加工;高体分铝基碳化硅;镍钴合金;抛物镜

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.082201

Optical Fabrication on High Volume Fraction SiC_p/Al Coating Nickel-Cobalt Alloy Paraboloid Mirror

Fan Di

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 In order to manufacture mirrors with fine mechanical and thermodynamic properties, the fabrication of high volume fraction SiC_p/Al coating nickel-cobalt alloy aspheric mirror is studied; the mechanical and thermodynamic properties of high volume fraction SiC_p/Al are introduced; then, several kinds of polish agent and model are used in experiments for polishing SiC_p/Al coating nickel-cobalt alloy samples; finally, on the basis of experiments, a Φ300 mm high volume fraction SiC_p/Al coating nickel-cobalt alloy paraboloid mirror is manufactured. The tested results indicate that surface accuracy of the mirror is 0.027 λ (RMS, λ =632.8 nm), and the surface roughness is 2.1 nm (R_a).

Key words optical fabrication; high volume fraction SiC_p/Al; nickel-cobalt alloy; paraboloid mirror

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 240.5450

1 引言

随着空间光学系统的不断发展,对空间光学系统反射镜的性能提出了更高的要求。空间光学系统反射镜材料除了应具有的光学特性和光学可加工性之外,还应该具有比刚度大,热变形系数小,导热性能好等热力学性能。目前空间光学系统反射镜镜体的首选材料是表面改性碳化硅^[1-3]。但是由于碳化硅镜坯制造难度大,硅改性层制备成本高,膜层薄等问题,限制了表面改性碳化硅反射镜的广泛应用。本文采用了与碳化硅性能接近但是更容易制备的高体分铝基碳化硅材料作为反射镜基底材料,运用光学表面电沉积镍钴合金的技术制备了非球面反射镜镜体,并对其进行了数控光学加工;实现了 300 mm 口径高体分铝基碳化硅表面镀镍钴合金同轴抛物面反射镜的光学加工,其面形精度均方根值为 0.027 λ (λ =632.8 nm),表面粗糙度 R_a 值优于 2.1 nm。

2 高体分铝基碳化硅(SiC_p/Al)材料性能

铝基碳化硅材料因其良好的力学和热学性能,广泛被用为空间反射镜的结构材料,本文所采用材料为碳化硅体积分数为 70%的高体分铝基碳化硅^[4]。如表 1 所示,高体分铝基碳化硅的热学与力学性能略差于

收稿日期: 2014-01-22; 收到修改稿日期: 2014-03-07; 网络出版日期: 2014-07-16

作者简介: 范 镛(1976—),男,博士,研究员,主要从事先进光学制造技术方面的研究。

E-mail: fandi_2000@hotmail.com

SiC,而远优于其他光学玻璃;但是由于它属于非匀质陶瓷材料,材料致密程度和均匀程度远不如光学玻璃,无法进行光学加工。在其表面采用电沉积的方式镀制一层镍钴合金,使其实现良好的光学加工性能^[5-6]。

表1 不同光学材料的物理性能

Table 1 Physical properties of different optical materials

	$\rho /(\text{g}/\text{cm}^3)$	E / GPa	$\alpha / (10^{-6} \text{K}^{-1})$	$E / \rho / (\text{GN} \cdot \text{m}/\text{kg})$	$K / (\text{W}/\text{mK})$
SiC _v /Al	3.00	265	6.5	88.3	162
SiC	3.04	330	2.4	112	170
Zerodur	2.53	92	-0.09	36.4	1.6
Al	2.70	68	22.5	25.2	167
Si	2.33	131	2.6	56.2	156
Fused silica	2.19	73	0.50	33.3	1.40

3 高体分铝基碳化硅表面镀镍钴合金抛物镜加工

非球面高体分铝基碳化硅反射镜的加工采用计算机控制光学表面成型(CCOS)技术。CCOS技术的原理是通过计算机控制小磨头在反射镜表面的运动轨迹和驻留时间,来实现对反射镜表面面形的修正。本文采用中国科学院长春光学精密机械与物理研究所组建的FSGJ-2型非球面数控光学加工中心来实现样片加工实验和非球面反射镜的光学加工。

3.1 高体分铝基碳化硅表面镀镍钴合金样片加工实验

采用不同的抛光模与抛光液对高体分铝基碳化硅表面镀镍钴合金样片进行数控抛光,具体实验条件如下:实验温度为 $25 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$,抛光模直径为30 mm,抛光模运动方式为平转动,压强为0.3 MPa,抛光模转速为200 r/min,抛光时间为10 min^[7]。

3.1.1 不同抛光模和抛光液的抛光效率

表2给出了三种不同抛光液(水基微米级氧化铝 Al_2O_3 ,水基微米级氧化铈 CeO_2 和水基微米级金刚石Diamond)和三种抛光模(沥青,聚氨酯和抛光绒布)相互组合抛光对样片镍钴合金层材料去除的情况。从表2中可以看出金刚石抛光液的去除效率最高,氧化铝最低,而沥青和聚氨酯抛光模效率接近,抛光绒布效率明显低于其他抛光模。

表2 不同抛光液和抛光模对样片镍钴合金层材料去除情况

Table 2 Nickel-cobalt alloy material removal with different polishing liquids and polishing molds				unit: μm
	Pitch	Polyurethane	Polish charpie	
Al_2O_3	0.59	0.62	0.36	
CeO_2	0.76	0.74	0.45	
Diamond	0.96	1.13	0.59	

3.1.2 不同抛光模和抛光液对样片表面质量的影响

表3给出了三种不同抛光液(水基微米级氧化铝,水基微米级氧化铈和水基微米级金刚石)和三种抛光模(沥青,聚氨酯和抛光绒布)相互组合抛光对样片镍钴合金层表面质量的影响。可以看出氧化铝抛光液和抛光绒布的抛光表面粗糙度最佳,而金刚石的最差;而目测表面可以看到,除了氧化铝抛光液和抛光绒布抛光表面外都存在不同程度的划痕,其中金刚石抛光表面密布划痕,且深度很大,而氧化铈和沥青抛光表面划痕相对较少,深度也较浅;只有氧化铝抛光液和抛光绒布组合可实现无划痕抛光,图1所示为抛光后样片表面粗糙度。

表3 不同抛光液和抛光模对样片镍钴合金层表面粗糙度的影响

Table 3 Influence of different polishing liquids and polishing molds on surface roughness of nickel-cobalt alloy				unit: nm
	Pitch	Polyurethane	Polish charpie	
Al_2O_3	2.9	3.2	2.1	
CeO_2	3.8	3.6	3.3	
Diamond	6.5	1.13	3.6	

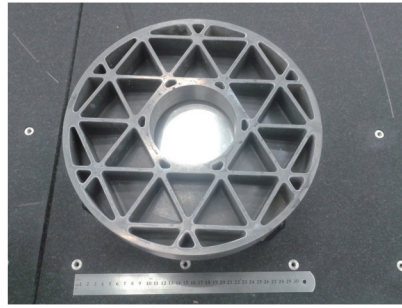


图1 300 mm 铝基碳化硅反射镜镜坯

Fig.1 300 mm high volume fraction SiC_p/Al

3.2 抛物面反射镜加工

待加工工件为直径为 300 mm 的铝基碳化硅反射镜镜坯(图 1),其目标值为焦距 400 mm,非球面二次项系数 $K=1$,面形精度均方根值小于等于 0.30。该反射镜加工流程如下: 1) 用高精度数控铣床将铝基碳化硅镜坯加工至峰谷值小于 $10\ \mu\text{m}$; 2) 采用电沉积法在镜坯光学面沉积厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 的镍钴合金膜层; 3) 运用高精度金刚石车床车削镜坯表面膜层, 使得其面形精度峰谷值小于 $2\ \mu\text{m}$, 零位干涉检测精度如图 2 所示; 4) 利用 FSGJ-2 型非球面数控加工中心对膜层进行均匀抛光, 以去除金刚石车床留下的刀痕, 图 3 为金刚石车削后膜层表面粗糙度; 5) 利用 FSGJ-2 型非球面数控加工中心结合零位干涉检测对膜层进行数控精密抛光, 直至面形精度达到要求。

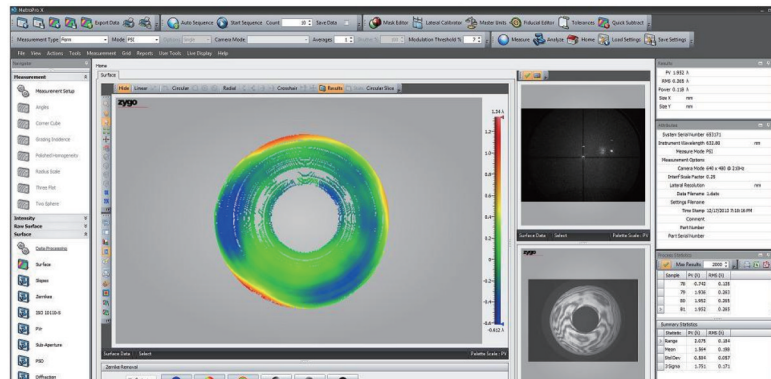


图2 金刚石车削后反射镜干涉检测结果

Fig.2 Interferometric testing result of the mirror after diamond turning

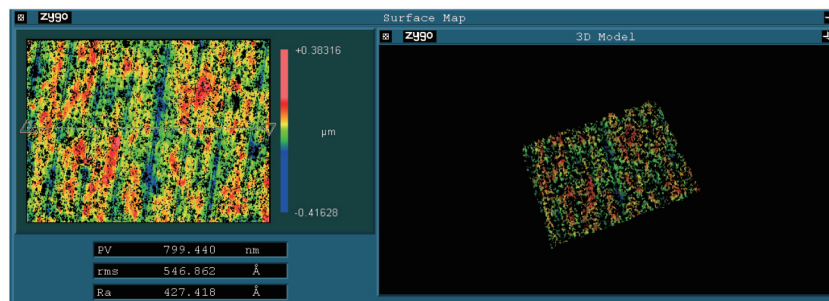


图3 金刚石车削后反射镜表面粗糙度

Fig.3 Surface roughness of the mirror after diamond turning

通过 3.1 节实验,在需要大量去除刀痕的均匀抛光阶段采用氧化铈与沥青抛光模结合抛光,以相对较少的划痕实现相对快速的材料去除;在需要精确去除和最佳表面质量的精密抛光阶段采用氧化铝抛光液和抛光绒布结合抛光。具体加工工艺条件如下:实验温度为 $25\pm 0.5\ ^\circ\text{C}$,抛光模直径为 $30\sim 70\ \text{mm}$,抛光模运动方式为平转动,压强为 $0.3\ \text{MPa}$,抛光模转速为 $200\ \text{r/min}$,均匀抛光阶段抛光模为 0.5 号沥青,精密抛光阶段抛光模为抛光绒布。经过 30 个加工周期,采用零位补偿法干涉检测对镜面进行检测,实现了面形精度均方根值优于 $0.030\ \lambda$ ($\lambda = 632.8\ \text{nm}$),表面粗糙度 R_a 值为 $2.1\ \text{nm}$ 的加工结果,如图 4 和图 5 所示。

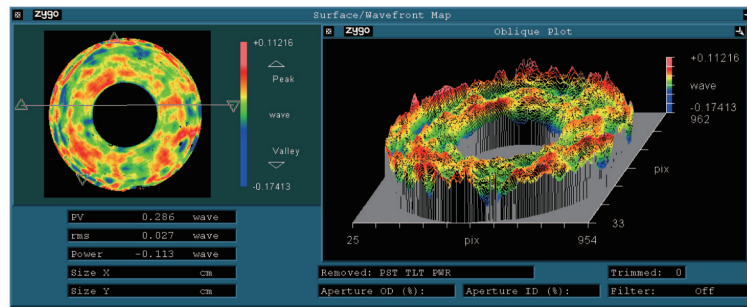


图4 抛物镜干涉检测结果

Fig.4 Interferometric testing result of the mirror after polishing

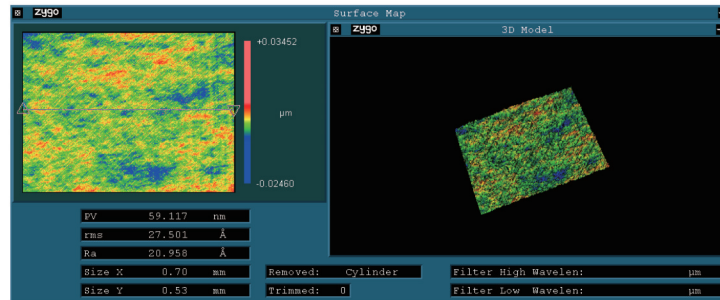


图5 抛物镜表面粗糙度检测结果

Fig.5 Surface roughness of the mirror after polishing

4 结 论

高体分铝基碳化硅镀镍钴合金反射镜经过适当的加工可以获得高质量、高精度的光学表面。利用CCOS技术对300 mm口径高体分铝基碳化硅表面镀镍钴合金同轴抛物面反射镜进行光学加工,最终检测结果表明:其面形精度均方根值为 0.027λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),表面粗糙度 R_a 值优于 2.1 nm 。

参 考 文 献

- 1 Zhang Feng, Deng Weijie. Magnetic medium assistant polishing of 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.
- 2 Wang Xiaokun, Zheng ligong, Zhang Xuejun. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2022-2026.
王孝坤, 郑立功, 张学军. 子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2022-2066.
- 3 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.
- 4 Liu Bingqiang, Li Jinglin, Wang Shuxin, *et al.*. Characteristic test of threads on high volume fraction SiC_p/Al composites [J]. Chinese Optics, 2011, 4(6): 576-582.
刘炳强, 李景林, 王书新, 等. 高体分SiC_p/Al复合材料螺纹性能测试[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 576-582.
- 5 Qu Xinxin, Ge Wen, Yang Qian, *et al.*. Pulse reverse electrodeposition of nanocrystalline nickel-cobalt alloy and its microstructure[J]. Electroplating & Finishing, 2013, 32(10): 14-18.
屈新鑫, 葛 文, 杨 倩, 等. 换向脉冲电沉积纳米晶镍钴合金及其微观结构[J]. 电镀与涂饰, 2013, 32(10): 14-18.
- 6 Liang Yan, Xu Yunhua, Li Xia, *et al.*. Influence of parameters on corrosion resistance of Ni-Co alloy in NaOH solution [J]. Corrosion & Protection, 2010, 31(5): 338-341.
梁 燕, 许韵华, 李 霞, 等. 工艺参数对高频脉冲电镀镍钴合金在NaOH溶液中耐蚀性的影响[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(5): 338-341.
- 7 Fan Di. The Study on CCOS of Large-Diameter SiC Mirrors[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. 6.
范 镝. 大口径碳化硅质反射镜数控光学加工的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004. 6.