

碳纤维-微晶复合材料反射镜光学加工实验

王慧军 薛芳 王鹏 夏英伟

(北京空间机电研究所,北京 100076)

文 摘 采用环抛方法对有预埋件和无预埋件的两块碳纤维-微晶复合材料反射镜进行光学加工,之后进行了稳定性实验研究,采用 Zygo 干涉仪实测了碳纤维-微晶复合材料反射镜面形。稳定实验后,有预埋件反射镜面形 $P-V$ 值为 3.013λ ,RMS 值为 0.669λ ;无预埋件反射镜面形 $P-V$ 值为 2.313λ ,RMS 值为 0.276λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。实验结果证明,有预埋件的碳纤维-微晶复合材料反射镜结构优于无预埋件结构,为碳纤维-微晶复合材料反射镜的工程化提供参考。

关键词 碳纤维复合材料,微晶,碳纤维-微晶复合材料,环抛,光学加工

Optical Polishing Experiment of C_f -Zerodur Composites Mirror

Wang Huijun Xue Fang Wang Peng Xia Yingwei

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076)

Abstract The two c_f -zerodur composites mirrors with and without pre-embedded parts are polished by continuous polishing method, and they are under stability experiment after polishing. The surface figures of the c_f -zerodur composites mirrors are measured by a Zygo interferometer. The surface errors of the mirror without pre-embedded parts after the stability experiment are as follows: the $P-V$ error is 2.313λ , the RMS error is 0.669λ . The surface errors of the mirror with pre-embedded parts after the stability experiment are as follows: the $P-V$ error is 3.013λ , the RMS error is 0.276λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$). The experimental results show that the structure of c_f -zerodur composites mirror with pre-embedded parts is better than that of without pre-embedded parts. The paper presents some references for the application of c_f -zerodur composites mirrors.

Key words C_f reinforced composites, Zerodur, C_f -zerodur composites, Continuous polishing, Optical polishing

0 引言

随着空间光学遥感技术的飞速发展,大口径光学反射镜成为光学系统的主流。常用大口径光学反射镜材料为碳化硅、微晶玻璃、超低热胀系数玻璃、熔石英和金属铝等^[1]。目前空间系统的发射费用约为 2~3 万美元/kg,光学系统的质量每减轻 100 kg,轻量化将节省上千万美元的发射费用^[2]。大口径光学反射镜减重方法有两类,一类是对材料进行轻量化设计,常用轻量化结构一般有背部开放式、背部半封闭式、背部全封闭式(夹层结构)和侧面贯穿孔四种方式^[1];另一类是在高刚度、低密度材料表面附着镜面材料。碳纤维复合材料具有轻质、耐热、耐湿和较高的力学性能,是目前热门的宇航用材料^[3-5]。

在国外,美国复合材料光学制造公司(Composite

Optics)早在 20 世纪 80 年代就开展了碳纤维复合材料反射镜成型技术研究,1995 年开始试制小型镜面,面形精度在 $1.5 \sim 3\lambda$ (RMS 值)^[5]。目前,法国 CERGA 项目用碳纤维复合材料已成功制造 1 m 口径反射镜,面形复制精度优于 $\lambda/25$ ($P-V$ 值)^[6]。在国内,国家天文台南京天文光学技术研究所、中科院光学精密机械研究所、北京空间机电研究所、中科院上海技术物理研究所等多家单位也对碳纤维复合材料反射镜展开了相关研究,并取得了一定成果^[5,7-9]。

本文采用环抛方法对有预埋件和无预埋件的碳纤维-微晶复合材料反射镜进行光学加工实验,并进行了稳定性实验研究,为碳纤维-微晶复合材料反射镜的工程化提供参考。

1 实验

收稿日期:2013-03-15;修回日期:2013-06-03

作者简介:王慧军,1975 年出生,博士,主要从事光学加工及检测。E-mail:catlw@163.com

碳纤维-微晶复合材料反射镜结构为:微晶玻璃板与碳纤维复合材料镜基通过胶结方式相连接,胶粘过程经过真空排气实验。为便于比较分析,进行光学加工的碳纤维-微晶复合材料平面反射镜有两块,其中一块在镜基中嵌入4个预埋件,另一块无预埋件。碳纤维-微晶复合材料平面反射镜直径为98 mm,厚度为25 mm,轻量化系数高于60%。

两块平面反射镜经过研磨后,在环抛机上进行抛光。环抛的优点如下:加工过程中平面光学元件浮动,无需胶结,因此不存在工件在上下盘时的变形问题;以复合轨迹运动实现材料去除,抛光均匀;转速慢,工件热变形小;抛光压力可控,便于面形修正^[10]。环抛工作原理如图1所示,将修正盘和工件置于抛光盘上,抛光盘绕主轴旋转的同时工件自转,达到均匀抛光的目的;抛光过程中修正盘自转,用于修正抛光盘面形。

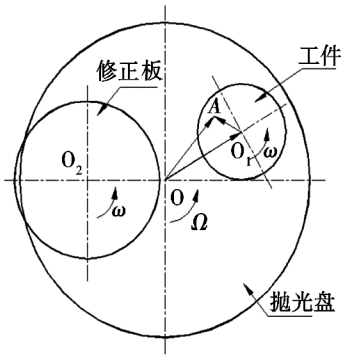


图1 环抛工作原理示意图

Fig.1 Scheme of mechanism of continuous polishing

在光学加工结束后,反射镜不再承受抛光压力,镜面应力释放会引起反射镜变形。为研究碳纤维-微晶复合材料平面反射镜的稳定性,光学加工结束后每隔2周,在同样的测试环境条件下反复测量其面形。两反射镜光学加工后多次测量,经历6个月后,面形最终稳定。

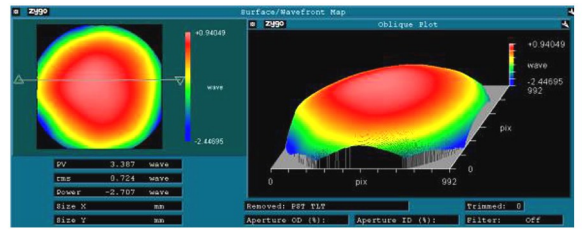
碳纤维-微晶复合材料平面反射镜面形检测均采用 Zygo 干涉仪 (VeriFire XPZ) 进行,检测环境温度 为 20℃,相对湿度为 45%。

2 结果与讨论

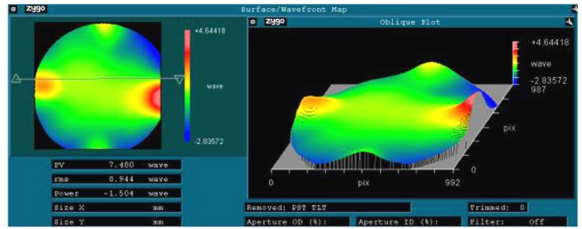
图2为碳纤维-微晶复合材料平面反射镜抛光前的面形,图2(a)中 $P-V$ 值为 3.387λ , RMS 值为 0.724λ ;图2(b)中 $P-V$ 值为 7.480λ , RMS 值为 0.944λ 。

从图2(b)可见,有四个明显高点,与四个预埋件位置相对应,其中最右侧点最高,沿最高点逆时针 90° 、 180° 方向两点次高,沿最高点顺时针 90° 方向一点最低,说明对应的4个预埋件中有一个引起反射镜面形凸起最为严重,两个次之,一个引起的面形变化

最小。可见,引起面形变化最小的预埋件工艺相对较为合理。



(a) 无预埋件

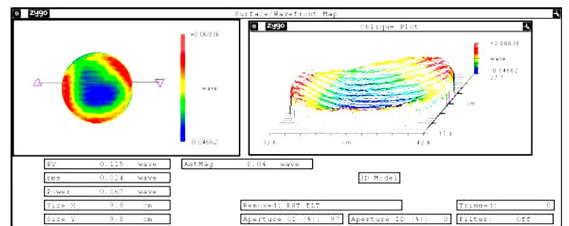


(b) 有预埋件

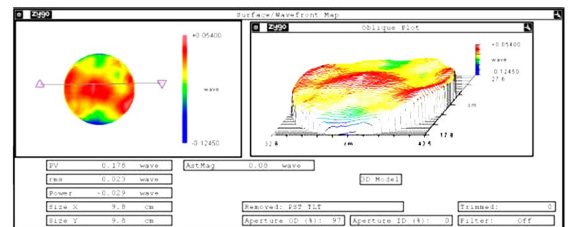
图2 抛光前碳纤维-微晶复合材料反射镜面形

Fig.2 Surface errors of the carbon-fiber-zerodur composites mirrors before polishing

图3为抛光后碳纤维-微晶复合材料平面反射镜面形,图3(a)中 $P-V$ 值为 0.115λ , RMS 值为 0.024λ ;图3(b)中 $P-V$ 值为 0.178λ , RMS 值为 0.023λ 。与图2相比,两反射镜面形精度均有了大幅提高。



(a) 无预埋件



(b) 有预埋件

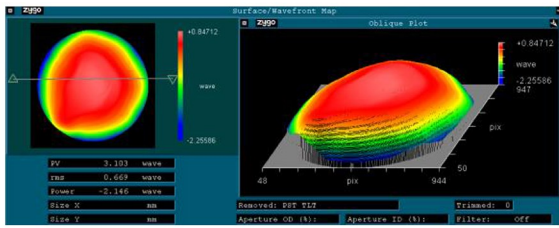
图3 抛光后碳纤维-微晶复合材料反射镜面形

Fig.3 Surface errors of the c_f -zerodur composites mirrors after polishing

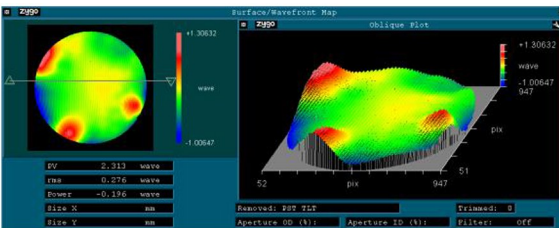
图4为加工结束面形最终稳定后碳纤维-微晶复合材料反射镜面形,与图3相比,面形精度均有大幅下降。图4(a)中 $P-V$ 值为 3.013λ , RMS 值为 0.669λ , power 值为 -2.146λ , 三种数值虽然优于图2(a),但是远远低于图3(a),说明无预埋件的碳纤维-微晶复合材料反射镜的整体结构工艺还有待提高。此外,在今后的光学加工中,可以尝试产生相反方向

的 power。

图 4(b)中 $P-V$ 值为 2.313λ , RMS 值为 0.276λ , power 值为 -0.196λ , 与图 4(a) 相比, $P-V$ 值降低了 23%, RMS 值降低了 58%, power 值降低了 90%, 这说明有预埋件的碳纤维-微晶复合材料反射镜结构优于无预埋件反射镜。图 4(b) 中有三处高点, 与图 2(b) 相对比, 其面形高点的分布规律相一致, 但高点减少一处, 面形的 RMS 值提高了 70%, 但预埋件的高点造成反射镜面形 $P-V$ 值较高, 说明在现有预埋件工艺基础之上碳纤维-微晶复合材料反射镜结构进一步改进, 其面形精度将有望大幅提高。此外, 还可以再尝试其他微抛光应力光学加工方法, 进一步减小应力释放的影响。



(a) 无预埋件



(b) 有预埋件

图 4 稳定后碳纤维-微晶复合材料反射镜面形

Fig. 3 Surface errors of the carbon-fiber-zero-dur composites mirrors after stability experiment

3 结论

通过光学加工实验和稳定性实验, 研究有预埋件和无预埋件的两块碳纤维-微晶复合材料反射镜。

稳定性实验后结果为: 有预埋件反射镜面形 $P-V$ 值为 3.013λ , RMS 值为 0.669λ ; 无预埋件反射镜面形 $P-V$ 值为 2.313λ , RMS 值为 0.276λ 。实验结果证明碳纤维-微晶复合材料反射镜有预埋件结构优于无预埋件结构, 但是两块反射镜稳定后的面形精度不理想, 说明复合材料反射镜整体工艺还需进一步优化、提高, 从而实现碳纤维-微晶复合材料反射镜工程化。

参考文献

- [1] Paul R, Yoder, Jr. Opto-mechanical systems design [M]. Third Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006
- [2] 张舸, 赵文兴. 轻质反射镜结构参数的分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 48-53
- [3] Brian Catanzaro, Dan Keane, Steve Connell, et al. Ultra lite glass/composite hybrid mirror [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 40(13): 663-671
- [4] Chen P C, Hale R D. Large aperture nanocomposite deformable mirror technology [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 672: 67210R-1-67210R-8
- [5] 盛磊. 用碳纤维复合材料制造轻型空间光学镜面[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(1): 52-56
- [6] 解永杰. 超轻量化碳纤维复合材料反射镜技术的进展[M]. 中国空间科学会空间光学专业委员会, 2008: 47-50
- [7] 郝伟娜, 姚正秋, 陈汉良. 碳纤维复合材料用于光学镜面[J]. 光学技术, 2001, 27(6): 505-506
- [8] 赵洪波, 马丽华, 姜志. 碳纤维复合材料反射镜面板的铺层设计[J]. 光学技术, 2003, 29(3): 365-367
- [9] 彭文臣, 孙胜利, 陈桂林, 等. 碳纤维复合材料制造轻量化空间光学反射镜[J]. 光学技术, 2006, 29: 138-140, 143
- [10] Cooke Frank, Brown Norman, Prochnow Eberhard. Annular lapping of precision optical flatware [J]. Optical Engineering, 1976, 15(5): 407-415

(编辑 吴坚)