

Φ380 mm 薄镜面预应力研磨及检测研究

姜自波^{1,2*}, 陈哲^{1,2}, 刘星涛^{1,2}, 焦晓洁^{1,2,3}, 陈坤新^{1,2}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所大口径光学技术研究室, 江苏 南京 210042;

²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 由于大口径望远镜主镜的拼接子镜为离轴非球面,所以增加了镜面的加工和检测难度。为了进一步提高离轴非球面子镜的加工效率和缩短抛光周期,本文利用预应力加载方法和基于蓝牙传输的接触式二维位移传感器阵列检测方法与相关装置,完成 Φ380 mm 口径的离轴非球面子镜的研磨实验。首先介绍预应力镜面加工的原理,接下来介绍 Φ380 mm 微晶玻璃镜面预应力研磨技术的检测方法和加载实验结果,然后介绍预应力研磨的收敛特性,最后利用三坐标测量机和接触式二维位移传感器阵列两种检测方法对研磨镜面的最终面形进行交叉检验。实验结果表明,预应力研磨方法具有可行性和较高的加工效率。

关键词 光学制造; 预应力研磨; 离轴非球面; 接触式检测; 拼接子镜; 蓝牙

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1622001

Study on Stressed Mirror Lapping and Testing of Φ380 mm Thin Mirror

Jiang Zibo^{1,2*}, Chen Zhe^{1,2}, Liu Xingtao^{1,2}, Jiao Xiaojie^{1,2,3}, Chen Kunxin^{1,2}

¹Optical Technology with Large Aperture Research Department, National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

²Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences,

Nanjing, Jiangsu 210042, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Since the spliced sub-mirror of the primary mirror of the large-aperture telescope is off-axis aspherical, it increases the difficulty of mirror processing and inspection. In order to further improve the processing efficiency of the off-axis aspheric sub-mirror and shorten the manufacture cycle, the stressing loading method and the bluetooth-based contact two-dimensional displacement sensor array detection method and related devices are used to complete the lapping experiment on an off-axis aspheric segment with a diameter of 380 mm. First, we introduce the principle of stressed mirror processing. Then, we introduce the test method on stressing lapping and loading experimental results on the Φ380 mm glass-ceramic mirror. Second, we introduce the convergence property of the stressed grinding processing. Finally, three coordinate measuring machine and contact two-dimensional displacement sensor array are used to cross check eventually surface shape of lapped mirror. The experimental results show that the stressed grinding method is feasible and high processing efficiency.

Key words optical fabrication; stressed mirror lapping; off-axis aspheric; contact measurement; splicing sub-mirror; bluetooth

OCIS codes 220.4610; 120.6650; 220.1250; 040.1240; 120.3940

收稿日期: 2021-01-11; 修回日期: 2021-02-05; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(U1531127, 11673044)

通信作者: *zbjiang@niaot.ac.cn

1 引言

由于望远镜口径的增大可加大集光面积并提升观测的分辨率,因此天文观测对地基光学望远镜口径的要求逐渐提高。对于现阶段多座在建或规划中的大口径地基望远镜,其主镜都采用了拼接镜面的形式,因为这种技术或理念可解决大口径的单体镜面在镜坯制造、检测和指向控制等方面的难题。目前,国际上有数台在建或规划中的 10 m 以上口径的地基光学望远镜已采用或计划采用拼接主镜的形式,如美国的 TMT(Thirty Meter Telescope)^[1]、欧洲的 ELT(Extremely Large Telescope)^[2]和中国规划中的 LOT(Large Optical/infrared Telescope)^[3]。加工离轴非球面镜的技术有 CCOS(Computer Controlled Optical Surfacing)加工技术^[4]、气囊抛光技术^[5]、离子束抛光技术^[6]、磁流变抛光技术^[7]、预应力抛光技术^[8]和主动抛光盘^[9]技术等。由于预应力抛光技术具有其他手段难以达到的高效去除率和表面平滑性,所以越来越受到研究人员的青睐。主镜的拼接子镜可先采用预应力研磨和抛光方法进行加工,然后使用离子束成形技术使镜面成形。诸多研究人员与机构都进行了预应力抛光技术的相关研究,如 Lubliner 等^[10-13]都对 SMP(Stressed Mirror Polishing)技术的发展进行了重要的研究工作。此外 Izazaga 等^[14]提出了基于离轴非球面的一种多项式表述形式,该形式可用于预应力抛光后镜面上干涉条纹分布的仿真。Valsan 等^[15]对预应力抛光过程中二维轮廓仪的敏感性和公差进行了仿真分析。此外中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的研究人员提出了采用预应力抛光法加工离轴 SiC 镜的构想,并对其进行了相关的仿真和概念设计^[16]。美国的 Coherent 公司^[17]、日本的 Canon 公司^[18]、欧洲的 LAM 和 SESO^[19]等机构也都在预应力抛光方面展开了系列的研究。中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所将预应力抛光和环抛技术结合起来,并进行了预应力环抛的系列实验探索,该技术可同时抛光数块不同面形的离轴子镜,提高了研制效率^[8,20]。

考虑到大口径望远镜主镜的拼接子镜为离轴非球面,这在实验过程中增加了非球面度的加工量,故可在预应力抛光之前先对加工镜面进行预应力研磨(有时称之为精磨或细磨)加工,以进一步提高离轴非球面子镜的加工效率,缩短抛光周期。需要特别指出的是,相同条件下研磨过程的加工效率是抛光

过程的数倍甚至更多,预应力研磨和抛光也应有类似的规律。但国内外鲜有报道预应力研磨的相关实验和定量研究结果,为此本文对其进行系列研究,得到预应力研磨的加工特性,相关实验结果可直接服务于天文望远镜大口径拼接离轴子镜的加工过程,为离轴子镜的加工提供更多的加工方法选项,而且可缩短望远镜的研制周期。本文首先介绍预应力镜面加工的原理,接下来介绍 $\Phi 380$ mm 微晶玻璃镜面预应力研磨技术的检测方法和加载实验结果,然后介绍预应力研磨的收敛特性,最后对最终面形测量中的支撑设计方案进行仿真分析。

2 预应力研磨原理

预应力研磨的原理与预应力抛光类似,就是利用加载机构对镜面边缘加载一定分布的横向剪切力和弯矩,使镜面发生弹性变形,变形为与所需非球面相反的面形,因剪切力和扭矩互为积分和微分关系,也可按照等效原则将边缘加载的分布剪切力变为一定分布的扭矩。在保持加载的情况下对镜面进行大工具经典的球面研磨和抛光,加工结束后将施加的横向剪切力(弯矩)和力矩释放,理论上镜面将反弹为所需的离轴非球面面形。二次离轴非球面镜的矢高分布可表示为

$$Z_{\text{asph}}(\rho, \theta) = \sum_{mn} \alpha_{mn}^{\text{seg}} \rho^m \cos(n\theta), \quad (1)$$

式中: Z_{asph} 为离轴非球面镜在局部坐标系 o_1-xyz 中的矢高,如图 1 所示; α_{mn}^{seg} 为面形的多项式系数; ρ 为径向归一化坐标, $\rho = r/a$, 其中 a 为镜面的半口径, r 为极坐标系中的径向坐标; θ 为极坐标系中的周向坐标; $m-n$ 为偶数,且 $m \geq n \geq 0$ 。前几项系数可表示为^[12]

$$\alpha_{20}^{\text{seg}} = \frac{a^2}{R_0} \left[\frac{2 - K\epsilon^2}{4(1 - K\epsilon^2)^{3/2}} \right], \quad (2)$$

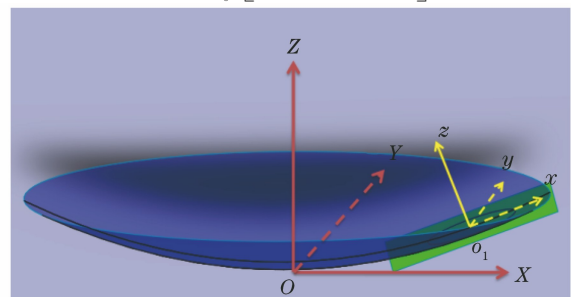


图 1 离轴非球面子镜的 $O-XYZ$ 全局坐标系和 o_1-xyz 局部坐标系

Fig. 1 $O-XYZ$ global coordinate system and o_1-xyz local coordinate system of off-axis aspherical mirror

$$\alpha_{22}^{\text{seg}} = \frac{a^2}{R_0} \left[\frac{K\epsilon^2}{4(1-K\epsilon^2)^{3/2}} \right], \quad (3)$$

$$\alpha_{31}^{\text{seg}} = \frac{a^3}{R_0^2} \left\{ \frac{K\epsilon [1 - (K+1)\epsilon^2]^{1/2} (4 - K\epsilon^2)}{8(1-K\epsilon^2)^3} \right\}, \quad (4)$$

式中: R_0 为二次非球面的顶点曲率半径; K 为二次曲面系数; $\epsilon = L/R_0$, 其中 L 为离轴量。对于比较球面, 矢高分布可简化为

$$Z_{\text{sph}}(\rho, \theta) = \sum_m \beta_m^{\text{sph}} \rho^m = \frac{a^2}{2R_{\text{comp}}} \rho^2 + \frac{a^4}{8R_{\text{comp}}^3} \rho^4 + \frac{a^6}{16R_{\text{comp}}^5} \rho^6 + \frac{5a^8}{128R_{\text{comp}}^7} \rho^8 + \dots, \quad (5)$$

式中: R_{comp} 为比较球面的曲率半径; β_m^{sph} 为比较球面面形的多项式系数。对于预应力加载面形, 系数可表示为

$$\alpha_{mn}^{\text{str}} = -(\alpha_{mn}^{\text{seg}} - \beta_m^{\text{sph}}). \quad (6)$$

另一方面, 对边缘施加的力和弯矩可表示为

$$M(\theta_i) = M_0 + \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cos(n\theta_i), \quad (7)$$

$$V(\theta_i) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\theta_i), \quad (8)$$

式中: M 和 V 分别为线密度形式的弯矩和横向剪切力; i 为加载点的序号, $i = 1, 2, 3, \dots, N$, N 为加载点总数。对于大口径望远镜主镜的拼接子镜, 子镜面形主要由(1)式的前几项组成, 具有较低的空间频率。以 TMT 为例, 镜面面形主要由离焦、像散和彗差分量组成, 其他面形分量可以忽略。弯矩和横向剪切力分布与加载面形多项式系数的关系由文献[10]化简为

$$M_0 = \frac{D}{a^2} (2 + \nu) \alpha_{20}^{\text{str}}, \quad (9)$$

$$V_0 = 0, \quad (10)$$

$$M_1 = \frac{D}{a^2} [2(3 + \nu)] \alpha_{31}^{\text{str}}, \quad (11)$$

$$V_1 = -\frac{M_1}{a}, \quad (12)$$

$$M_2 = \frac{D}{a^2} [2(1 - \nu)] \alpha_{22}^{\text{str}}, \quad (13)$$

$$V_2 = \frac{2M_2}{a}, \quad (14)$$

式中: D 为镜面的弯曲刚度, 且满足 $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$, 其中 ν 为泊松比, h 为镜厚, E 为弹性模量。根据(1)~(14)式, 最终可得到所需的加载力分布。本文使用在镜面背部专门设计的加载机构为

镜面施加特定的剪切力和弯矩, 使镜面发生弯曲变形。考虑到最大可调节压强等因素, 本文的边缘加载点数 $N = 8$ 。

3 基于预应力研磨技术的测试、加载和研磨实验

本文以一个口径为 30 m 的望远镜光学模型参数为基础, 按模型的 1:4 进行计算, 得到缩比后的望远镜主镜及拼接子镜的参数, 并已完成一块 $\Phi 380$ mm 口径拼接子镜的预应力研磨非球面实验, 预应力研磨实验镜面的几何与材料参数如表 1 所示, 其中 ROC 为曲率半径。实验过程中, 使用经典抛光机上的加载装置为弯月球面镜背面的外边缘加载一定分布的力和弯矩。在保持镜面变形的情况下, 利用大工具对镜面进行研磨(细磨), 研磨一段时间后对镜面面形进行在位检测, 并根据检测结果修正加载力、力矩或研磨工艺参数, 直至镜面面形与理论面形的差值收敛到可接受值。

表 1 预应力研磨实验的几何与材料参数

Table 1 Geometrical and material parameters of prestressed grinding experiments

Parameter	Value
Conic constant	-1
Off-axis distance / m	3
Diameter / m	0.380
Maximum detectable radius / m	0.179
Thickness / m	0.015
ROC of reference mirror / m	15.3856
ROC of vertex / m	15.0000
ROC of comparative sphere / m	15.4248
Modulus of elasticity / GPa	90.3
Poisson ratio	0.243
Density / (kg · m ⁻³)	2580

表 1 中的最大可探测半径为二维阵列传感器的最大分布圆半径; 参考镜抛光完成后的曲率半径的实测值是利用卷尺测量得到的, 5 次测量的最大测量偏差为 2.7 mm, 测量平均值为 15385.6 mm; 望远镜主镜的 $R_{\text{comp}} = R_0 - \frac{KL_{\text{max}}^2}{2R_0}$, 其中 L_{max} 为子镜的最大离轴量。

3.1 二维位移传感器阵列

根据不同的测量原理, 离轴非球面镜(可视多项式曲面)在各加工阶段可选择合适的检测方案^[21]。对于大口径离轴非球面镜的检测和预应力面形加载的动态检测, 二维位移传感器阵列

(TDDSA)检测方法具有独特的优势。基于此,2012年李新南等^[8]利用接触式二维线性可变差动变压器(LVDT, Linear Variable Differential Transformer)阵列面形检测装置对预应力环抛过程中的镜面进行了检测。2012年,Müller等^[22]利用一个9点位移传感器线阵对预应力抛光后的TMT子镜进行了检测。2016年,Mueller等^[17]利用61点二维表面轮廓仪对预应力抛光后的镜面进行了检测。本文设计一种新型的基于蓝牙传输的分布接触式二维位移传感器阵列检测系统,该系统由21只基于蓝牙数据传输的位移传感器二维阵列、基板、支撑杆、电动升降台及其位置与运动控制箱、蓝牙采集电路和数据采集处理软件等组成,优点是位移传感器的数据传输方式为蓝牙传输方式,检测过程中可避免线路缠绕,有利于检测机构的紧凑设计,而且可方便地利用该检测机构进行旋转拼接测量,检测系统如图2所示。

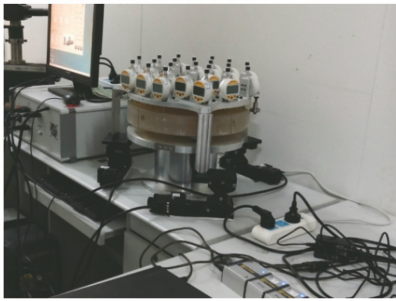


图 2 TDDSA 面形检测系统
Fig. 2 TDDSA surface detection system

3.2 预应力加载实验

对于预应力加载情况,需要将镜面加载为与非球面相反的面形,注意加载量的计算应该以比较球面为参照。对于离焦分量,预应力加载分量可表示为

$$\Delta c_{20}^{str} = -(c_{20}^{seg} - c_{20}^{comp}), \quad (15)$$

式中: c_{20}^{seg} 和 c_{20}^{comp} 分别为理想离轴非球面和比较球面以Zernike多项式表示的离焦分离系数,各系数的几何意义如图3所示,相似的表述参考文献^[23],而本文对比较球面、初始球面和参考球面进行仔细区分。

本文在预应力细磨前完成了预应力加载机构的加载性能标定工作,其中加载机构结构如图4所示。经计算在 $\Phi 358$ mm的最大探测口径内理论预应力面形(相对于比较球面)主要由离焦、像散和彗差三部分组成,各面形分量的Zernike多项式系数 $c_{20}^{str} = 5.726 \mu\text{m}$ 、 $c_{22}^{str} = 20.114 \mu\text{m}$ 和 $c_{31}^{str} = 0.761 \mu\text{m}$ 。经

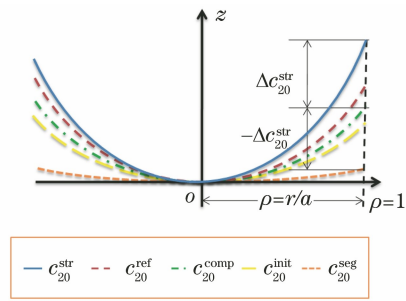


图 3 不同离焦系数的意义与关系
Fig. 3 Significance and relation of different defocus coefficients

过三次加载(两次加载修正)可以得到最终的加载面形,经过实测可以得到各次加载面形偏离理论面形的各面形分量的Zernike多项式系数分布曲线,如图5所示。从图5可以看到,最终加载面形偏离理论面形的峰谷(PV)值为 $1.572 \mu\text{m}$,方均根(RMS)值为 $0.3 \mu\text{m}$ 。对于预应力研磨加载标定来说,尽管受到模型和加工等误差因素的影响,使加载面形与理论加载面形可能会有一定程度的微小偏离,但是经过加载修正后的残差和加载重复性误差可满足后续抛光加工的衔接要求与检测机构的检测精度。

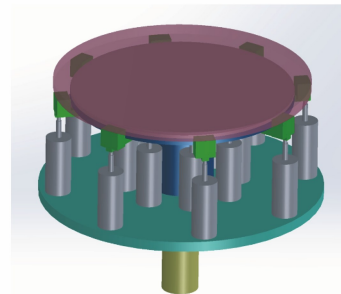


图 4 预应力加载机构
Fig. 4 Prestressed loading mechanism

3.3 预应力研磨实验及收敛特性

预应力细磨的镜面参数如表1所示,预应力细磨现场照片如图6所示。经过多轮细磨-检测循环后,最终得到的预应力细磨收敛曲线如图7(a)所示。测量方式为停机在位相对测量,即加工子镜仅去掉加载力和力矩,在保持加载机构不拆卸的状态下进行相对测量。需要说明的是,从开始到5.17 h,检测方式为单次相对测量(未多次旋转拼接),采样点数最多为21点,面形拟合过程中的项数选取9项。从5.17 h开始改进为三次旋转数据拼接测量(旋转角度分别为 0° 、 120° 和 240°),采样点数最多为63个,拟合项数取16项。从图7(a)可以看到,累积研磨时间约6 h后,面形开始进入震荡区;经过近6 h的研磨累积时间,在 $\Phi 358$ mm测量

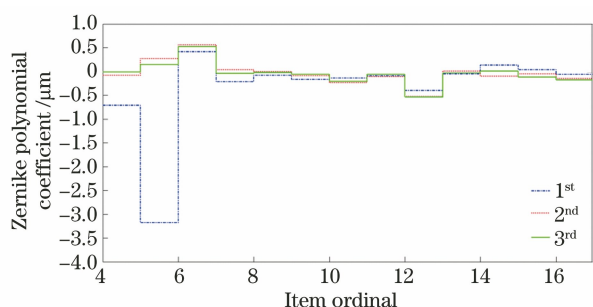


图 5 经多次加载修正后镜面变形与理论面形之差的 Zernike 多项式系数分布曲线

Fig. 5 Zernike polynomial coefficient distribution curves of difference between mirror deformation and theoretical surface shape after multiple loading correction

范围内镜面面形与理论所需的离轴抛物面的偏离从约 $45 \mu\text{m}$ 收敛至近 $5 \mu\text{m}$, 该范围为研磨快速收敛区。可以将此结果与文献[8]中的预应力环抛收敛曲线进行比较, 结果如图 7(b) 所示。从

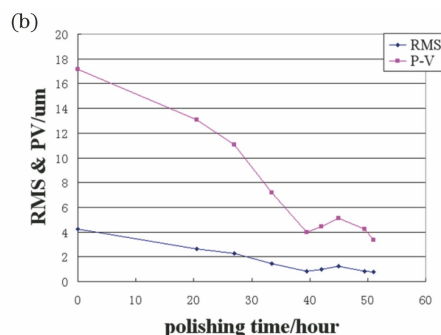
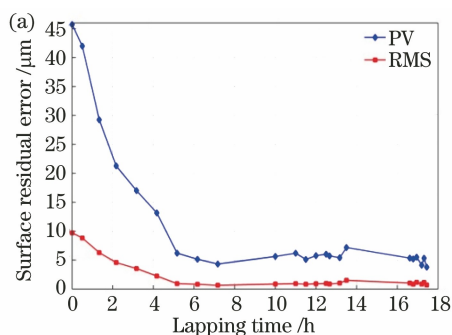


图 7 预应力加工收敛曲线。(a)预应力研磨实验;(b)文献[8]

Fig. 7 Convergence curves of stressing processing. (a) Stressing lapping experiment; (b) Ref. [8]

后续采用少磨多测的策略来避免面形研磨过度。研磨材料所使用的工艺为研磨至 5.17 h 之前为 W40 # (标称尺寸范围为 $28 \sim 40 \mu\text{m}$) 磨料, 5.17~10.00 h 使用 W28 # (标称尺寸范围为 $20 \sim 28 \mu\text{m}$) 研磨材料, 此后使用 W14 # (标称尺寸范围为 $10 \sim 14 \mu\text{m}$) 研磨材料至结束。研磨过程中调整加工设备的工艺参数, 以修正研磨镜面的曲率半径。在累积研磨时间超过 16 h 之后, 为了更好地改变预应力镜面的曲率半径, 改用直径为 $\Phi 180 \text{ mm}$ 的较小工具和 $\Phi 380 \text{ mm}$ 的整工具组合研磨, 可以加快曲率半径的改变速度, 图 7 为大研磨工具的研磨累积时间, 因大小研磨工具的接触面积不等, 不易等效, 小抛光工具的累积抛光时间约 1.63 h 未计入。最后在镜面上选取 6 个点位进行表面粗糙度测量, 6 点的表面粗糙度平均结果 $R_a = 0.377 \mu\text{m}$,

图 7(b) 可以看到, 在预应力环抛实验中对一块 $\Phi 330 \text{ mm}$ 的离轴子镜进行加工, 经过近 40 h 的累积预应力环抛加工, 镜面面形与理论所需的离轴非球面面形的偏离从约 $17 \mu\text{m}$ 收敛至近 $4 \mu\text{m}$ 。综上可知, 预应力研磨的加工效率相比于预应力抛光或预应力环抛提高了数倍。



图 6 预应力研磨实验现场

Fig. 6 Process scene of stressing lapping

结果表明预应力研磨实验可得到较好的镜面表面粗糙度及均匀性。表面粗糙度测量现场如图 8 所示。

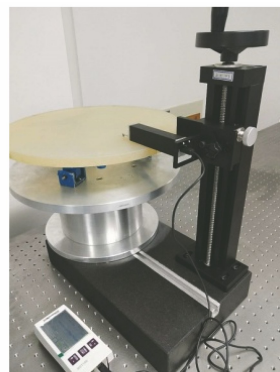


图 8 镜面的表面粗糙度测量现场

Fig. 8 Mirror surface roughness measurement site

4 最终镜面面形的检测

4.1 最终面形检测的支撑设计

在预应力研磨的在线检测过程中,预应力研磨镜的支撑方式为背部 5 mm 厚的珍珠棉泡沫近均匀支撑,相对测量使用的参考镜支撑方式为三点支撑方式,在线测试过程中钢垫未去除。研磨结束后的镜面测量由专门设计的 9 点 Whiffletree 结构支撑,图 9 中虚线三角形的顶点为镜面支撑位置。其中参考镜和预应力研磨镜均为微晶玻璃。经过有限元分析软件优化后,得到了镜面 9 点支撑分布方案。经过仿真分析可知,相同口径的最终弯月预应力研磨镜和参考镜之间的 PV 值为 $0.049 \mu\text{m}$,RMS 值为 $0.011 \mu\text{m}$,远优于测量误差。

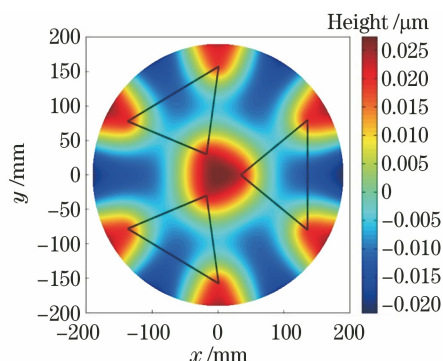


图 9 9 点 Whiffletree 支撑情况下弯月镜与参考球面镜之间的相对变形

Fig. 9 Relative deformation between meniscus and reference spherical mirror with 9 points Whiffletree support

4.2 三坐标测量机和接触式 TDDSA 测量方法的交叉验证

经过预应力研磨和在线检测之后,将镜面从预应力加载装置上拆卸下来,并将镜子背面的钢垫取下,分别使用图 10 的三坐标测量机(CMM)和接触式二维位移传感器阵列对预应力研磨镜(镜面用 9 点 Whiffletree 结构支撑)进行测量,接触式二维位移传感器阵列的最大测量范围为 $\Phi 358 \text{ mm}$ 圆域,测量结果以 Zernike 多项式系数表示(相对于比较球面),结果如表 2 和图 11 所示。在 $\Phi 358 \text{ mm}$ 口径内,三坐标测量机的 6 次测量结果偏离理论非球面的平均 PV 值和 RMS 值分别为 $3.815 \mu\text{m}$ 和 $0.716 \mu\text{m}$ 。在 $\Phi 358 \text{ mm}$ 口径内,接触式二维位移传感器阵列三次测量(每次旋转 0° 、 120° 和 240° 后拟合)结果偏离理论非球面的平均 PV 值和 RMS 值分别为 $3.451 \mu\text{m}$ 和 $0.570 \mu\text{m}$ 。可见经过十几个小时的累积研磨,本文将 $\Phi 380 \text{ mm}$ 离轴非球面子镜

(工艺成熟后可压缩研磨收敛时间)从起始球面加工至与理论离轴非球面面形残差在 $\Phi 358 \text{ mm}$ 区域内小于 $4 \mu\text{m}$ 的面形。由此可见本实验的预应力研磨加工大为缩短了后续预应力抛光所需的时间。

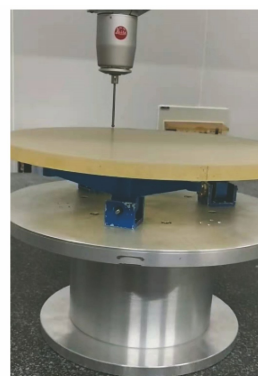


图 10 预应力研磨后的 CMM 面形检测

Fig. 10 Measuring of surface shape after stressing lapping using CMM

表 2 CMM 和接触式 TDDSA 的检测结果

Table 2 Detection results of CMM and contact type TDDSA

Coefficient	Average value of CMM test / μm	Average value of TDDSA test / μm
c_{20}	-6.5760	-6.3500
c_{22}	-20.4200	-20.7460
c_{2-2}	-0.6720	0.1510
c_{31}	-0.5310	-0.6940
c_{3-1}	-0.0895	-0.3540
c_{40}	-0.8910	-0.4420
c_{33}	0.0985	0.2400
c_{3-3}	-0.0975	-0.4330
c_{42}	-0.0876	-0.1210
c_{4-2}	0.0115	-0.1910
c_{51}	0.0070	-0.0615
c_{5-1}	-0.0491	0.1160
c_{60}	-0.2850	-0.4750

5 结 论

经过预应力研磨实验,本文将一块 $\Phi 380 \text{ mm}$ 口径的球面弯月反射镜加工成离轴抛物面镜。经过近 6 h 的研磨累积时间,在 $\Phi 358 \text{ mm}$ 测量范围内镜面面形与理论所需的离轴抛物面的偏离从约 $45 \mu\text{m}$ 收敛至近 $5 \mu\text{m}$,该范围为研磨快速收敛区,将此结果与文献[8]的预应力环抛光结果进行对比,在该实验中对一块 $\Phi 330 \text{ mm}$ 的离轴子镜进行加工,经过近 40 h 的累积预应力环抛加工,镜面面形与理论所需的离轴非球面面形的偏离从约 $17 \mu\text{m}$ 收敛至近 $4 \mu\text{m}$,该范围为抛光快速收敛区。实验结果表明,

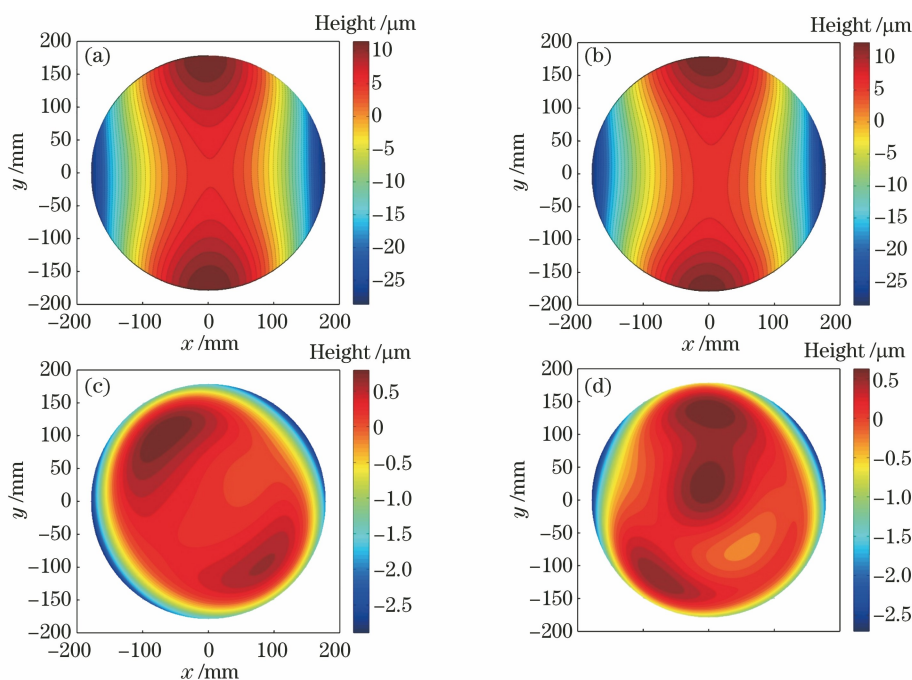


图 11 CMM 和接触式 TDDSA 的最终检测结果。(a) CMM 多次测量得到的平均表面面形;(b)接触式 TDDSA 多次测量得到的平均表面面形;(c) CMM 多次测量得到的平均表面面形与理论离轴非球面面形之间的残差分布;(d)接触式 TDDSA 多次测量得到的平均表面面形与理论离轴非球面面形之间的残差分布

Fig. 11 Final detection results of CMM and contact TDDSA. (a) Average surface shape obtained by multiple measurements using CMM; (b) average surface profile obtained by multiple measurements of contact TDDSA; (c) residual distribution between average surface profile and theoretical off-axis aspheric surface profile obtained by multiple measurements using CMM; (d) residual distribution between average surface profile and theoretical off-axis aspheric surface profile obtained by multiple measurements of contact TDDSA

相较于其他预应力研磨方法,所提方法的加工效率有了显著提高。本实验的创新之处:1)通过预应力细磨实验展示相对于预应力抛光方法的加工高效性,并给出预应力研磨的收敛特性和粗糙度评价结果;2)设计并应用基于蓝牙数据传输方式的接触式二维位移传感器阵列的检测方法和装置,使检测系统结构简洁轻便,并有利于方便地旋转拼接测量。本文的预应力加载和面形检测等方法以及加工经验可有助于中国 LOT 望远镜或 TMT 等拼接子镜在抛光前的快速非球面化,缩短离轴非球面镜的加工周期,提高加工效率。

参 考 文 献

- [1] Baffes C, Mast T, Nelson J, et al. Primary mirror segmentation studies for the thirty meter telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7018: 70180S.
- [2] European southern observatory. The E-ELT construction proposal [EB/OL]. [2021-01-05]. <https://www.docin.com/p-1367888347.html>.
- [3] Su D Q, Liang M, Yuan X Y, et al. A suggested 12-m telescope optical system configuration for China [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 460(2): 2286-2295.
- [4] Zhang F. Computer-controlled chemical mechanical polishing of silicon modification layer on aspheric silicon carbide surface [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3015-3020.
张峰. 非球面碳化硅表面硅改性层的数控化学机械抛光[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3015-3020.
- [5] Gray C, Baker I, Davies G, et al. Fast manufacturing of E-ELT mirror segments using CNC polishing [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8838: 88380K.
- [6] Wang Y N, Jiang S L, Sun G B, et al. Ion beam polishing equivalent removal and polishing experiments[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 032501.
王玉宁, 蒋世磊, 孙国斌, 等. 离子束抛光等量去除的实现及抛光实验[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 032501.
- [7] Yang H, Song S P, Zhang S, et al. Response time of flow transient process of magnetorheological finishing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 032201.

- 杨航, 宋书飘, 张帅, 等. 磁流变抛光流场瞬变过程响应时间[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 032201.
- [8] Li X N, Zhang H Y, Cui X Q, et al. Study on stressed mirror polishing with continuous polishing machine for large aperture off-axis aspheric mirror [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2012, 53(2): 161-170.
- 李新南, 章海鹰, 崔向群, 等. 大口径离轴非球面镜预应力环抛方法研究[J]. 天文学报, 2012, 53(2): 161-170.
- [9] Zhu Z, Gao B L, Li X N, et al. Optical technology and testing method using stressed lap to polish asphere[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 341-343.
- 朱政, 高必烈, 李新南, 等. 主动抛光盘磨制非球面的工艺与面形检测[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 341-343.
- [10] Lubliner J, Nelson J E. Stressed mirror polishing 1: a technique for producing nonaxisymmetric mirrors [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(14): 2332-2340.
- [11] Nelson J E, Gabor G, Hunt L K, et al. Stressed mirror polishing. 2: fabrication of an off-axis section of a paraboloid[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(14): 2341-2352.
- [12] Mast T S, Nelson J E. Fabrication of the Keck ten meter telescope primary mirror [J]. *Proceedings of SPIE*, 1985, 542: 48-59.
- [13] Lemared S, Ferrari M, Dufour T, et al. High performance large lightweight mirrors fabrication adapted to stress-mirror polishing (SMP) technique [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11180: 111806T.
- [14] Izazaga R, Aguirre-Aguirre D, Villalobos-Mendoza B. Off-axis conic surfaces: interferogram simulation algorithm and its use in stressed mirror polishing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 112: 284-291.
- [15] Valsan V, Sriram S, Basheer A, et al. Sensitivity and tolerance analysis of 2D profilometer for TMT primary mirror segments [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10742: 1074210.
- [16] Yi L Q, Zhang X J, Hu H F, et al. Comprehensive study of the rapid stressed mirror polishing method for off-axis aspheric SiC thin-plate mirrors [J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32802-32818.
- [17] Mueller U. Production metrology design and calibration for TMT primary mirror fabrication used at multiple manufacturing sites [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9906: 99060Z.
- [18] Oota T, Negishi M, Shinonaga H, et al. High volume production trial of mirror segments for the thirty meter telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9145: 91451J.
- [19] Hugot E, Bernard A, Laslandes M, et al. Stress polishing demonstrator for ELT M1 segments and industrialization [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9145: 914539.
- [20] Li X N, Jiang Z B, Gong X F, et al. Stressed mirror annular polishing for scale-down TMT primary segments [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9912: 99120A.
- [21] Zhu R H, Sun Y, Shen H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0112001.
- 朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0112001.
- [22] Müller U, Daniel J. Tinsley proves stress mirror polishing for giant segmented telescopes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8450: 845025.
- [23] Li C Q, Lei B P, Han Y. The advancement of the high precision stress polishing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9683: 96831F.