

## 大口径硅基空间红外透镜的高精度加工与检测 (特邀)

王国燕, 许 瑞, 于秋跃, 王永刚, 孟晓辉

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:** 随着红外技术的不断发展, 空间大口径红外光学元件的需求日益增长, 其各项制造指标也逐渐接近可见光级光学元件的制造要求, 由此对新型空间红外光学元件的加工和检测技术均提出了更高的挑战。针对大口径的高陡度超薄硅基红外透镜, 提出了以超声铣磨-机器人研抛-离子束精抛为工艺链路的加工方案, 改善了传统红外工艺路线存在的低效率、表面高频误差等问题。针对凸非球面轮廓检测中支撑引起的测试误差, 在粗抛和精抛阶段分别采用了柔性缓冲支撑与三点强迫位移支撑方法, 有效解决了大口径高陡度超薄透镜测试中的支撑变形问题。经过理论仿真与实验验证, 证明该测试方法具有较好的一致性。通过改进的轮廓检测方法, 实现了轮廓测试中支撑误差的准确分离, 有效提升了加工的极限精度。最终大口径红外透镜凸非球面加工精度达  $\text{RMS } \lambda/50$  ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ), 满足设计指标要求。

**关键词:** 光学加工; 空间红外透镜; 轮廓检测; 支撑误差

**中图分类号:** TH706      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20220427

## High precision manufacturing and testing of large aperture silicon-based space infrared lens (*invited*)

Wang Guoyan, Xu Rui, Yu Qiuyue, Wang Yonggang, Meng Xiaohui

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** With the development of infrared technology, the demand for large aperture space infrared optics is increasing. Their manufacturing indexes are approaching the manufacturing requirements of visible optics gradually, which poses a higher challenge to the processing and testing technology of new infrared optics. A processing scheme of ultrasonic milling, robot grinding and ion beam polishing was proposed for the manufacturing of large diameter ultra-thin silicon-based infrared lens with high gradient. This method overcame the defects of low efficiency and high frequency surface error caused by single process. In order to avoid the testing error caused by supporting force in contour testing of the aspherical convex side, flexible buffer supporting and three-point forced displacement supporting were applied in rough and fine polishing phases respectively, which effectively solved the supporting deformation problem in the testing of large aperture and high gradient ultra-thin lens. Through theoretical simulation and experimental verification, it was proved that the testing method had good consistency. An improved contour detection method was adopted to achieve accurate separation of supporting error in contour testing, and has effectively improved the limit accuracy of manufacturing. Finally, the machining accuracy of convex aspheric surface with large diameter mm infrared lens reached  $\text{RMS } \lambda/50$  ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ), which satisfied the design requirements.

**Key words:** optical manufacturing; space infrared lens; contour test; supporting error

收稿日期:2022-06-22; 修订日期:2022-08-24

作者简介:王国燕,女,工程师,博士,主要研究方向为先进光学加工与检测。

## 0 引言

红外技术,包括红外成像技术、红外对抗技术和红外隐身技术,对提高国防实力、促进经济发展具有深远意义。这些先进技术广泛应用于航天和民用的各个领域<sup>[1-4]</sup>。红外光学系统作为其中不可或缺的组成部分之一,直接制约着整个系统的性能。因此,红外光学器件对红外系统的整体性能起着重要的作用。随着空间红外技术的不断发展,新型空间红外光学元件的各方面制造指标逐渐接近可见光级光学元件的制造要求。以某红外相机为例,其中包含硅、锗材料的红外透镜共12件。透镜组中硅透镜最大口径超过200 mm,远超传统红外光学元件~100 mm量级口径。在面形制造要求方面,透镜表面设计为高次非球面,低频面形精度优于 $RMS \lambda/50$ ,中高频误差满足36项泽尼克系数拟合残差优于 $\lambda/100 RMS$ ,远远超出目前普通红外光学元件的加工指标。在结构上,大口径空间红外透镜具有小 $F$ 数(~0.4)、大径厚比(~15:1)等特点,极易受到重力误差影响,从而严重影响加工和检测的准确性。除此之外,多星组网、多网协同的空间遥感任务对透镜组大批量、一致性高效加工提出了更高的要求。由此可见,传统的红外加工模式无法满足大口径空间红外透镜的高效、批组化研制需求,必须从加工链路优化、产能提升以及全链路的检测技术入手探索更加高质量、高效率的工艺路线,从而突破目前技术路线加工精度和效率的瓶颈。

单点金刚石车削技术具有污染少、效率高、均匀性好等优点,并且可以加工非球面和自由曲面等各种复杂表面,加工精度 $PV$ 可达亚微米级<sup>[5-6]</sup>。因此,目前大部分红外光学元件在镜坯成型后主要依赖单点金刚石车削完成面形的加工。这一工艺路径对设备和技术的要求相对单一,因而获得了行业内的广泛应用。然而,单点金刚石车削产生的车削痕迹导致透镜表面残留明显的环状高频误差,严重影响空间红外光学系统的成像质量<sup>[7]</sup>。因此,空间红外透镜元件必须在单点金刚石车削的基础上进行表面平滑和抛光,才能达到空间光学系统的使用要求。此外,对于大口径空间红外透镜而言,车削过程中的刀具磨损不可避免,从而严重降低了车削的面形精度和表面质量<sup>[8]</sup>。即使采用性能优良的进口天然金刚石刀具或者采用

激光辅助车削技术,依然无法在工程上有效解决大口径红外透镜的车削成形和表面质量的同步控制<sup>[9]</sup>。以大口径硅透镜为例,由于车削至透镜中心时刀具相对于透镜表面的线速度降低,在不考虑刀具磨损的情况下中心区域亚表面损伤层厚度超过 $5 \mu m$ 。这种情况下依赖抛光手段完全去除亚表面损伤层不仅效率低下,而且会破坏车削后的面形精度。因此,传统红外工艺路线应用于空间大口径红外透镜加工存在较大局限性,必须从全局出发开展大口径空间红外透镜工艺路线研究,从而满足高效率、高精度的制造要求。

在面形检测方面,高次非球面检测通常采用补偿器或CGH进行干涉检测<sup>[10]</sup>。当面形测试精度要求较高时,需要配套高精度地面重力卸载装置实施重力卸载。上述方法需要投产配套的补偿器、CGH以及卸载装置,并搭建、调试检测光路,存在操作复杂、检测周期长、经济投入大等问题,无法满足空间红外透镜批组化研制过程中的高频次、短周期检测需求。非接触式轮廓检测技术具有精度高、操作简便、测试效率高等优点,对于凹/凸面形的高次非球面均有较好的适用性,满足红外透镜快节奏的检测需求。然而,轮廓检测对待测元件的刚性有较高的要求,否则极易引起支撑误差,从而误导加工的判断<sup>[11]</sup>。因此,必须采取快速有效的改进措施排除空间红外透镜轮廓检测中支撑误差对检测结果的干扰,为面形误差的确定性收敛提供依据。

针对上述问题,文中提出了以超声铣磨-机器人研抛-离子束精抛为工艺链路的加工方案,通过工艺路线优化解决空间大口径红外光学元件的制造困境。全流程均采用轮廓检测方案提供快速、准确的加工依据。根据不同加工阶段,分别采取微柔性缓冲薄垫支撑方法和三点支撑法实现透镜支撑误差的准确剔除,提高轮廓检测的准确性。由于篇幅限制且各加工工艺研究成果较为丰富,因此文中将围绕研抛和离子束精抛阶段的检测难点进行重点研究与详细介绍,从而为其他大口径高精度红外透镜制造提供借鉴思路。以大口径硅透镜的高次凸非球面为例,验证工艺路线和检测方法的有效性,最终加工指标满足设计要求。

## 1 透镜设计指标

作为一种流行的红外光学材料,硅在中短波红外光学系统中得到了广泛的应用,特别是在红外透镜的制造中。某大口径红外硅透镜元件凸面面形设计要求如下:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 \quad (1)$$

式中:  $r^2 = x^2 + y^2$ ;  $c=1/R$ ,  $R$  为非球面顶点曲率半径;  $k$  为非球面系数;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为高次非球面系数。凸面非球面透镜的表面参数及精度要求如表 1 所示。此外,要求最终加工面形中高频误差符合如下要求: Zernike 多项式 36 项拟合残差  $RMS < 0.02\lambda$ ;  $Z9 < 0.04\lambda$ ,  $Z15$ 、 $Z25$ 、 $Z36 < 0.01\lambda$ 。

表 1 凸非球面面形参数 ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )

Tab.1 Parameters of the convex aspheric surface ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )

R/mm	k	A	B	C	PV	RMS
339.333 1±0.1	0	-1.288E-10	-1.283E-15	6.342E-20	1/5λ	λ/50

## 2 大口径红外透镜加工及检测工艺

### 2.1 整体工艺链路及指标分配

根据透镜设计参数及指标要求,通过多工序组合加工的方式(如图 1 所示)实现透镜凸面面形的逐步收敛,从而充分发挥各项技术的加工优势,提高整体的加工效率,实现面形精度与表面质量的同步控制。

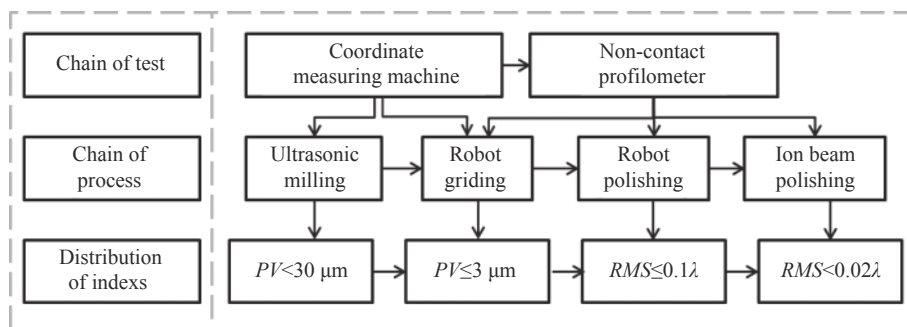


图 1 凸非球面总体工艺流程

Fig.1 Process chain of the convex aspheric surface

### 2.2 具体加工工艺

由于硅材料的硬脆特性,其在研抛工序的材料去除率较低。因此,在首道工序中应尽可能多地完成材料去除,并控制亚表面损伤层的厚度,从而减少研抛的材料去除量,缩短加工周期。超声铣磨技术利用超声振动的脉冲作用,减低刀具与工件的摩擦系数,从而大幅降低了铣削作用力和刀具温度,实现刀具磨损和材料去除方式的同步改善,能够有效提高硬脆材料的加工效率和质量<sup>[12]</sup>。铣磨加工时首先对镜坯的外形尺寸进行加工,然后进行光学表面的面形铣磨。为了控制铣磨后的表面质量,缩短研磨工序的工时,最后一道铣磨工序采用颗粒度为 54# 的金刚石砂轮去除较深的铣磨刀痕,并进一步减小亚表面损伤层的厚度,磨削残留的破坏层深度约为 10 μm。非球面铣磨完成后,其面形精度约为  $PV 30 \mu\text{m}$ 。

机器人研抛技术基于计算机控制光学表面成形原理,利用机械臂控制其末端研抛工具头的精密运

动,通过调节加工轨迹的驻留时间和压力等参数,实现光学元件面形的确定性加工<sup>[13]</sup>。研磨阶段,采用偏心小磨盘与金刚石微粉实现铣磨刀痕和面形误差的快速收敛。在抛光阶段,为了避免偏心小磨盘加工出现的边缘效应,采用柔性气囊头去除面形误差并提升表面光洁度<sup>[14]</sup>。通过改变研抛液的种类和粒径,多次迭代后非球面面形精度可达  $RMS 0.1\lambda$ ,表面粗糙度  $\leq 3 \text{ nm}$ 。

离子束成形 (IBF) 技术具有去除纳米级表面误差的能力,并且具有去除稳定、无边缘效应、加工精度高等优点,在光学元件的超精密加工中得到了广泛应用。根据离子束溅射原理,具有一定能量的离子束 ( $\text{Ar}^+$ ) 轰击工件表面时,  $\text{Ar}^+$  离子会不断地与工件浅层表面的原子发生碰撞,并在碰撞过程中交换能量。获得能量的原子继续将能量转移给邻近的原子,从而产生一连串的运动。当原子获得的能量足够时就可以脱离表面束缚,实现原子级去除精度的非接触式加

工<sup>[15]</sup>。离子束加工中,综合考虑加工效率和高频误差去除能力,经过多种参数组合仿真,最终选定束径 20 mm 的去函数进行精修加工,并通过加工轨迹优化约束加工过程的热效应<sup>[16-17]</sup>。离子束精修后不会影响工件的表面光洁度,此时非球面的面形精度可以收敛至  $RMS \leq \lambda/50$ 。

### 3 轮廓检测工艺及误差剔除方法

#### 3.1 总体检测工艺

在透镜凸非球面的铣磨和研磨初期,其表面精度较低,可采用三坐标测量机对其面形进行离散点测量,再通过算法进行数据拟合从而获取面形误差,其测试精度极限约为  $PV 5 \mu\text{m}$ 。随着面形精度以及表面光洁度的提高,可采用非接触式轮廓仪检测透镜凸非球面的面形。文中采用的非接触式轮廓仪检测精度优于  $10 \text{ nm RMS}$ ,该设备利用非接触式探头对放置于高精度气浮转台的待测光学元件表面进行螺旋扫描,从而计算光学表面的面形误差。为了保证检测精度,应控制透镜与转台的同轴度与倾斜误差分别优于  $50 \mu\text{m}$  和  $1'$ ,环境温度应控制在  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,实验室防振等级不低于二级。为了控制顶点曲率半径偏差,对轮廓仪的采样结果进行数据处理时仅拟合平移、倾斜误差,对其他面形设计参数进行强制拟合。该方法用于回转类零件的高频次测试,具有操作简便、精度高、周期短等优点。但由于设备的局限性和透镜结构的特殊性,在面形精修阶段,通过气浮转台直接支撑透镜进行测试往往容易引入支撑误差,严重干扰了加工的判断。因此必须采取有效的措施实现支撑误差的解耦,从而获取准确、真实的面形误差指导进一步加工。由于铣磨和研磨阶段的面形三坐标检测工艺较为常规,因此文中不展开描述详细检测细节,将重点介绍抛光阶段的高精度轮廓面形检测工艺。

#### 3.2 高精度轮廓检测的支撑误差剔除方法

由于透镜自身结构的特点,相比于反射类光学元件,透镜在轮廓检测过程中更易受支撑力影响发生变形。当面形加工进入抛光阶段时,随着面形精度的逐渐提高,透镜因支撑引起的变形对轮廓测试的影响逐渐增大。此时,支撑误差与真实面形误差相互耦合,且支撑误差的分布形式及量级存在较大的随机性,难以进行定量化解耦,从而严重限制了加工精度的进一步提升。针对上述问题,在粗抛阶段,在轮廓仪气浮

转台上增加具有三明治结构的微柔性缓冲垫用于透镜的支撑。该方法一方面避免了透镜凹面的基准平台与气浮转台之间的直接硬接触,同时也避免了测试过程中透镜轴向和径向的微扰动,能够快速均衡各支撑点的受力,具有方便快捷的优点。

随着抛光后面形精度的提升,加之透镜自身超薄径厚比及高陡度的特点,支撑引起的透镜变形对高精度的面形测试影响逐渐增大。柔性缓冲垫与透镜凹面平台基准的作用点和作用力均无法量化,由此产生的透镜变形使得不同角度测试的面形分布趋势与数值存在较大差异,同时也难以进行准确的支撑误差分离,从而无法做出下一步针对性精修的准确判断,严重限制了加工精度的极限。因此,在透镜凸面高精度面形抛光阶段,柔性缓冲支撑方式以无法满足准确的面形误差测试需求,必须采用支撑误差可量化分离的轮廓测试技术指导面形的高精度收敛。

在轮廓仪面形测试中,除了设备自身的系统误差,测试误差的来源主要分为两个部分,分别是透镜像光轴相对轮廓仪转台的位置误差,包括平移和倾斜误差,以及透镜受支撑力作用引起的变形。其中,透镜放置的平移和倾斜误差可以通过软件算法进行定量分析和去除。支撑力引起的透镜变形属于弹性变形,相对于透镜的口径而言属于高阶小量,当作用力卸载后相应的变形量也随之消失。因此,基于弹性力学理论,假定环境温度恒定,透镜内部材料均匀且连续,则透镜内任意微小单元均满足如下平衡方程<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中,沿镜面坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的正应力和切应力分别为  $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$  和  $(\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy})$ ;  $(F_x, F_y, F_z)$  为单位体积沿各个方向的单位力。根据公式 (1) 的应力可得各微小单元沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的正应变  $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$  和剪切应变  $(\gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy})$  分别为:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = [\sigma_x - (\sigma_y + \sigma_z)] / E \\ \varepsilon_y = [\sigma_y - (\sigma_x + \sigma_z)] / E \\ \varepsilon_z = [\sigma_z - (\sigma_x + \sigma_y)] / E \\ \gamma_{xy} = \tau_{xy} / G \\ \gamma_{yz} = \tau_{yz} / G \\ \gamma_{xz} = \tau_{xz} / G \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $G$  为材料的剪切模量。根据各微小单元的连续位移, 可得透镜沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的位移分量( $u, v, w$ )如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{array} \right. \quad (4)$$

根据上述力学模型, 针对透镜结构设计了如图 2(a) 所示的三点均布支撑方案, 在透镜边缘平台基准处设置三个夹角为  $120^\circ$  的刚性支撑点。支撑点与透镜之间的作用力可以简化为点作用力, 从而根据公式 (2)~(4) 可以计算出三点支撑作用下透镜表面的微位移量<sup>[19-20]</sup>, 如图 2(b) 所示。根据 Zernike 多项式拟合分析, 透镜表面的微位移对应的面形误差约为  $RMS$   $0.067\lambda$ , 分布形式为三阶像散, 如图 2(c) 所示。该方法利用支撑作用力迫使透镜产生确定性的面形误差, 从而可以实现支撑误差的准确解耦。

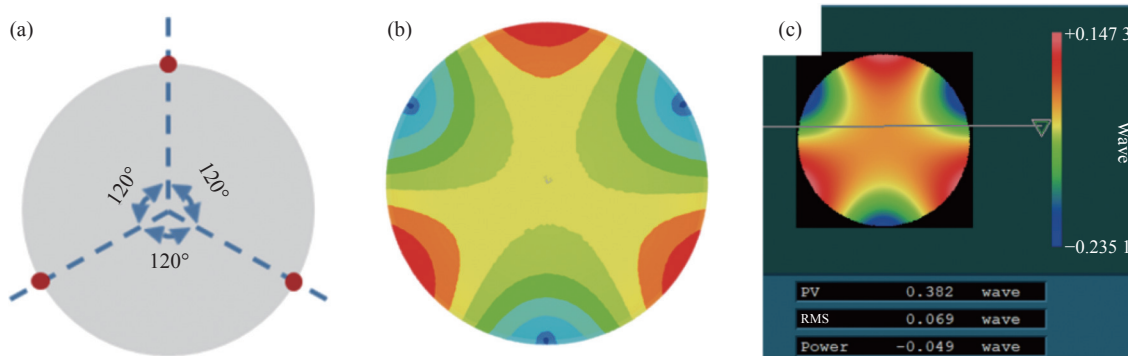


图 2 三点支撑测试。(a) 示意图; (b) 表面微位移分布; (c) 支撑引起的面形误差

Fig.2 Three-point supporting measurement. (a) Schematic diagram; (b) Distribution of micro displacement on surface; (c) Shape error induced by supporting force

#### 4 加工结果与分析

镜坯先通过超声铣磨完成外形结构、加工基准的加工, 然后进行凸球面非球面形铣磨, 其三坐标面形检测结果如图 3(a) 所示。此时面形精度约为  $PV \sim 32.4 \mu\text{m}$ , 面形误差分布基本趋于轴对称。随后, 采用机械手研磨对铣磨后的面形误差进行去除, 通过多轮迭代后的面形检测结果如图 3(b) 所示。通过不同颗粒金刚石微粉的研磨后面形快速提升至  $PV \sim 3 \mu\text{m}$ , 此时面形误差主要呈环带分布, 与磨盘加工轨迹吻合, 有效口径边缘有明显的塌边, 塌边深度约占全口径  $PV$  值的 83%。此时, 若继续采用偏心小磨头抛光, 一则其环状加工轨迹会阻碍透镜中高频误差的收敛, 二则边缘塌边现象会随着加工时间的增加而逐渐严重, 从而影响透镜的有效通光口径。

针对图 3(b) 小磨头研磨后的面形进行离子束加工仿真, 分别采用束径 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、

50 mm 和 60 mm 的离子源束流, 仿真后的加工结果及面形收敛趋势分别如图 4 和图 5 所示。图 5 中箭头所指虚线分别代表小磨头研磨后的面形  $RMS$  与  $PV$  值。从图中可以看出, 当研磨加工后面形残差较大时, 严重影响了后续离子束加工的收敛效果, 即使采用 10 mm 束径的离子源其加工收敛率仍不足 50%, 且此时离子束加工时间相比大束径离子源增加 5~10 倍, 不仅增加了研制的时间与成本, 而且长时加工导致的镜面热效应积累也会影响离子束的精修精度。

因此, 在抛光阶段, 将机器人抛光工具头由偏心小磨头替换为柔性气囊头, 按照栅线轨迹进行全口径面形加工与表面粗糙度提升。此外, 为了避免产生走刀痕迹, 在气囊抛光过程中每轮后将栅线轨迹旋转  $45^\circ$ , 从而避免镜面相同位置走刀痕迹不断加深, 产生环状中高频误差。在气囊抛光初期, 采用 819 氧化铈进行面形加工和粗糙度提升。当表面粗糙度小于

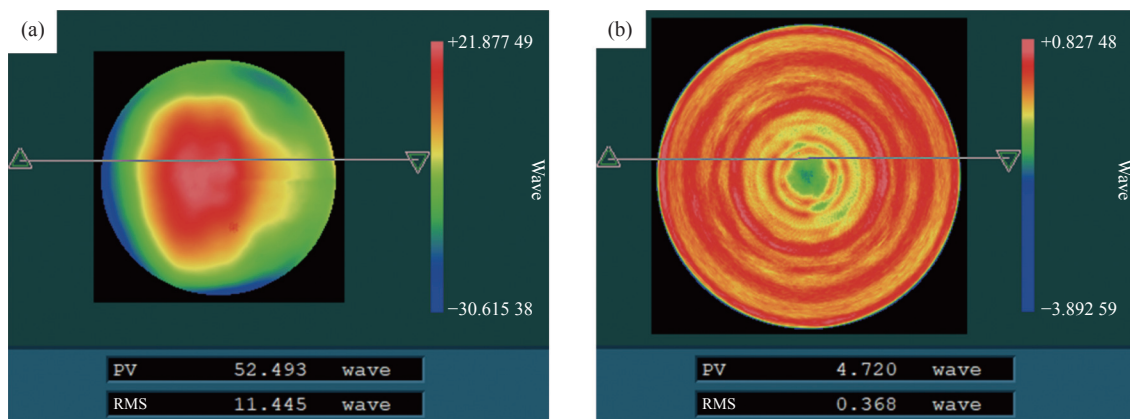


图 3 三坐标测试结果。(a) 超声铣磨;(b) 机器人研磨

Fig.3 Results of three coordinate measuring machine. (a) Ultrasonic milling; (b) Robot grinding

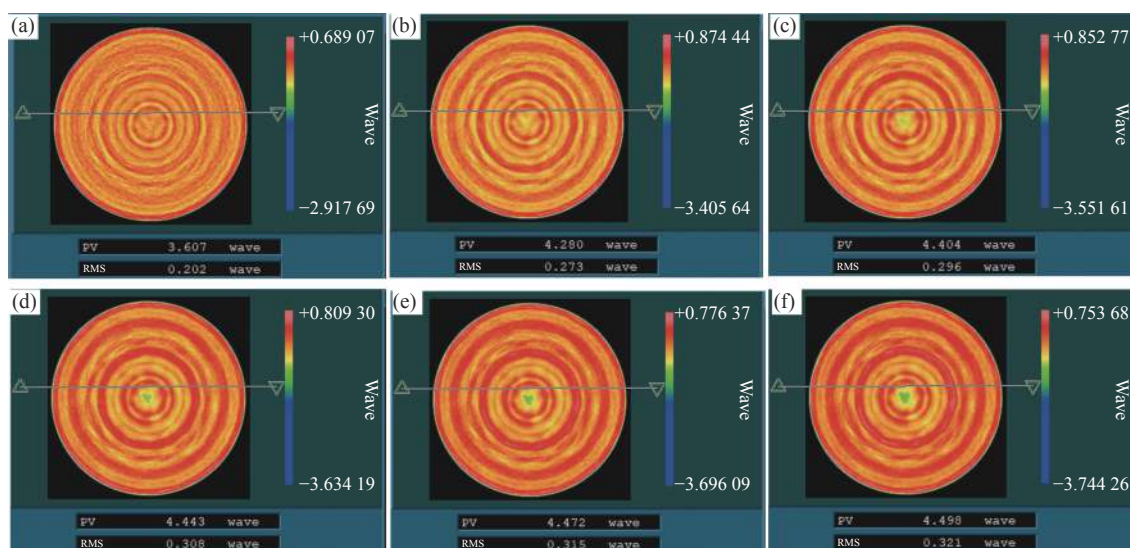


图 4 小磨头研磨后离子束加工仿真结果。(a)~(f) 分别对应 10~60 mm 离子源束流

Fig.4 Simulation results of ion beam machining after small mill head grinding. (a)-(f) 10-60 mm ion source beam diameter, respectively

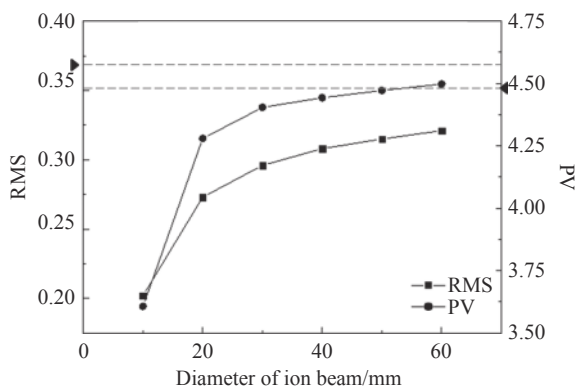


图 5 小磨头研磨后离子束加工仿真面形收敛趋势

Fig.5 Convergence trend of ion beam machining simulation after small mill head grinding

10 nm 后, 改用 50 nm 硅胶液进一步提升表面光洁度并平滑面形, 使之满足离子束入口精度要求。

在抛光过程中, 当透镜表面抛亮后改用非接触式轮廓仪检测, 采用第 3 节所述的柔性支撑方法测试了透镜的凸面面形, 结果如图 6(a) 所示。为了进一步判断像散的真实性, 保持缓冲垫不动, 仅将透镜旋转 90°并重复测试, 结果如图 6(b) 所示。通过对比分析可知, 像散随透镜转动改变, 且转动前后测试面形一致, 因此可将像散确定为面形误差, 在下一个工序中进行确定性去除。

经过机器人抛光工序的多轮迭代, 采用柔性缓冲垫支撑的透镜凸面轮廓仪面形测试结果如图 7 所示, 分别测试了 0°和 90°方向作为对比。此时, 凸面面形有了明显收敛, 基本满足离子束精抛的面形入口精度要求, 但仍残留了较明显的像散。

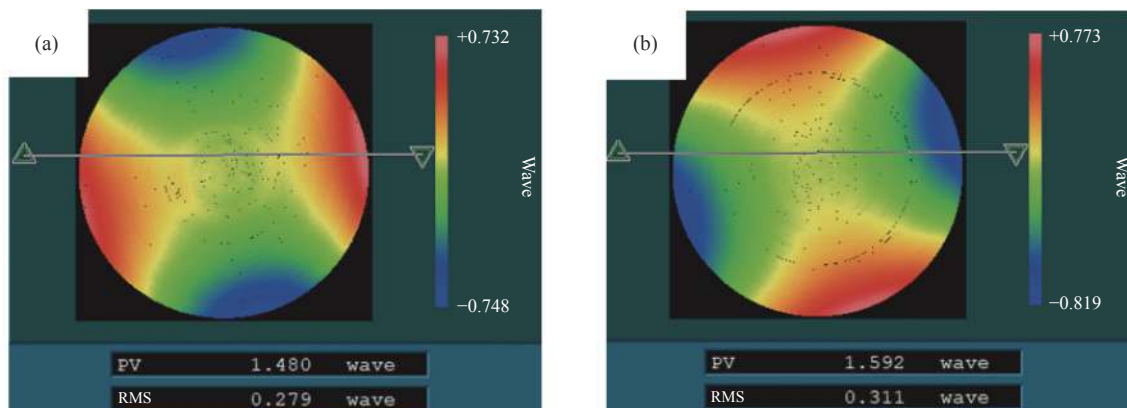


图 6 透镜凸面轮廓测试面形误差-Loop1。(a) 0°; (b) 90°

Fig.6 Surface error of the convex side tested by contourgraph-Loop1. (a) 0°; (b) 90°

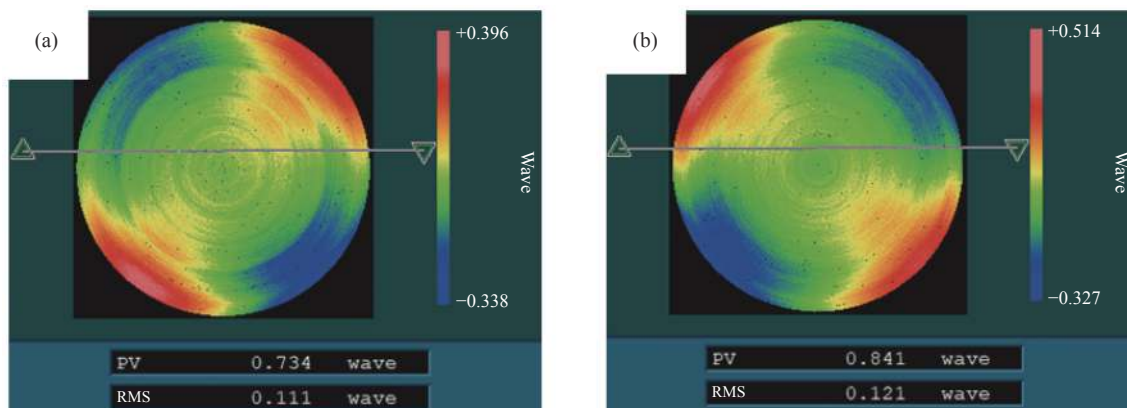


图 7 透镜凸面轮廓测试面形误差-Loop2。(a) 0°; (b) 90°

Fig.7 Surface error of the convex side tested by contourgraph-Loop2. (a) 0°; (b) 90°

小磨头研磨及气囊抛光后的加工面形残差对比如图 8 所示。从图中可以看出,小磨头研磨后面形残差呈明显的中高频环状分布,残差  $RMS\ 0.28\lambda$ , 如果不予控制最终透镜的中高频误差无法满足指标要求。

通过气囊抛光、平滑以及加工轨迹的优化,抛光后的面形残差明显减小,残差  $RMS\ 0.02\lambda$ , 此时采用离子束精抛才能达到理想的收敛效果。

第三轮面形精修采用离子束抛光技术对残留的

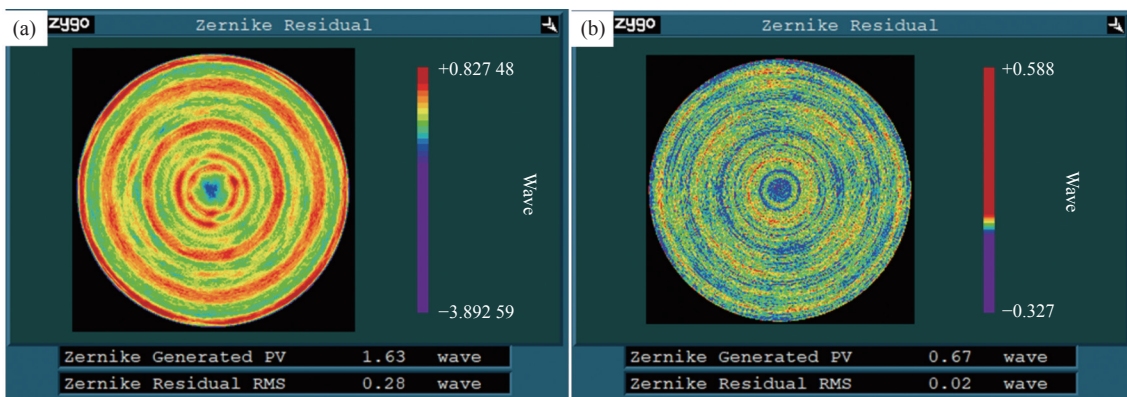


图 8 加工面形残差。(a) 小磨头研磨; (b) 气囊抛光

Fig.8 Residual of machining surface. (a) Grinding of small mill head; (b) Airbag polishing

像散做进一步的误差去除。利用三点支撑作用下测得的面形误差减去支撑引起的变形误差,即可实现支撑误差分离,获得真实的面形误差分布。为了验证该方法测试的一致性,将透镜旋转 180°重复测试,两次测试结果如图 9 所示。由图可见,根据初始测试结果

提取的 0°和 180°方向实际支撑误差(三阶像散)分别为 0.1λ 和 0.092λ RMS,说明其具有较好的重复性,且其分布趋势与数值与仿真计算结果吻合。误差剔除后,0°和 180°方向的真实面形测试结果具有较好的一致性,平均 RMS 约为 0.036λ。

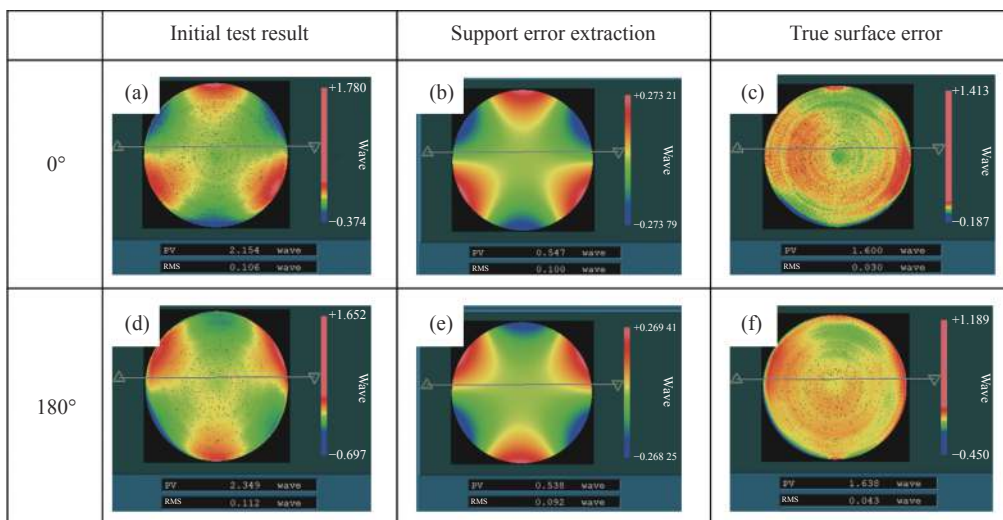


图 9 基于三点支撑测试的透镜凸面面形误差-Loop3。(a)~(c) 0°; (d)~(f) 180°

Fig.9 Surface error of the convex side based on three-point supporting measurement-Loop3. (a)-(c) 0°; (d)-(f) 180°

基于图 9 的测试结果开展第二轮离子束精修,加工后的测试结果如图 10 所示,剔除支撑误差后,0°和 180°测试的平均面形误差为 RMS 0.019λ, Zernike36 项拟合残差为 RMS 0.01λ, Z9、Z15、Z25、

Z36 分别约为 0.01λ、-0.002λ、0.008λ、-0.001λ,具有较好的一致性,非球面拟合顶点曲率半径偏差 < 0.02 mm,面形精度、中高频误差与几何参数均满足设计指标要求。

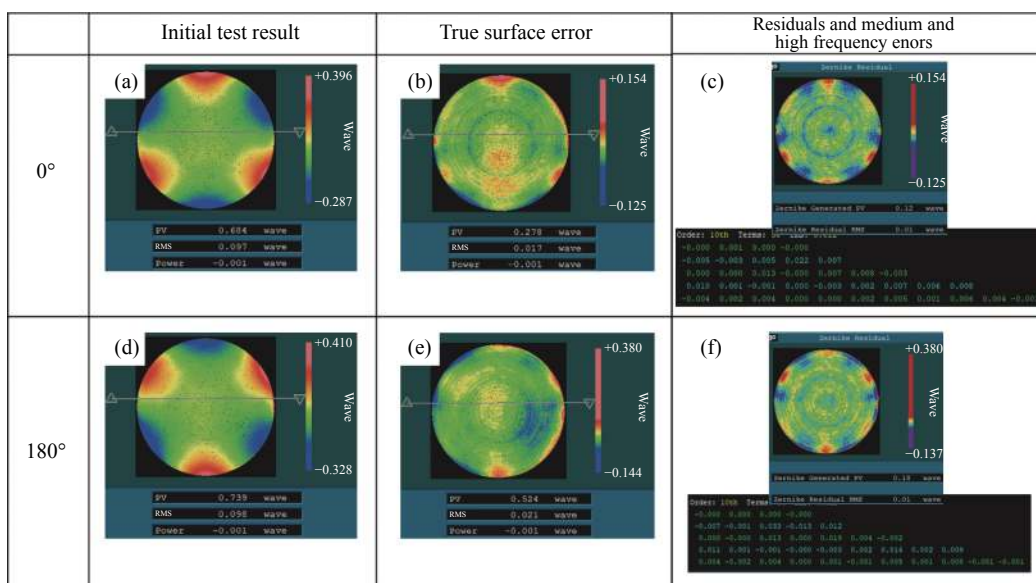


图 10 基于三点支撑测试的透镜凸面面形误差-Loop4。(a)~(c) 0°; (d)~(f) 180°

Fig.10 Surface error of the convex side based on three-point supporting measurement-Loop4: (a)-(c) 0°; (d)-(f) 180°



## 5 结 论

针对新型红外光学元件大口径、高陡度、易变性等特点,提出了超声铣磨-机器人研抛-离子束精修的复合工艺路线,改善了传统单一研抛或车削工序存在的低效、残留高频误差等缺点。以大口径红外透镜的凸非球面为例,介绍了加工的具体过程、指标分配及检测方法。针对支撑引起的随机测试误差限制加工精度的问题,提出在粗抛和精抛阶段分别采用柔性缓冲支撑与三点强迫位移支撑方法。通过理论仿真与实验验证,证实了该方法具有较好的一致性,从而实现了大口径高陡度超薄透镜测试中的支撑误差的准确分离,为突破加工精度极限奠定了基础。最终,大口径红外透镜凸非球面加工精度达  $RMS \lambda/50$  ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ),满足设计指标要求。研究结果对新型空间大口径红外光学元件的高精度加工与检测具有重要的应用价值。

### 参考文献:

- [1] Wang Lingxue, Cai Yi. Recent progress and perspectives of infrared optical systems [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(1): 1-12. (in Chinese)
- [2] Huang Y F, Xu J, Bai S J. Satellite infrared remote sensing technology and its application in disaster prevention and relief [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(5): 118-126. (in Chinese)
- [3] Deng Sanyong, Yue Song, Zhang Dongliang, et al. Design of solid-immersion infrared metalens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(3): 20210360. (in Chinese)
- [4] Li X D, Huang Y, Zhang P Q. Infrared imaging system and application [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(3): 229-234. (in Chinese)
- [5] Li Shijie, Xu Chao, Huang Yuetian, et al. Processing technology of cutting ZnS crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190567. (in Chinese)
- [6] Goel S. The current understanding on the diamond machining of silicon carbide [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(24): 243001.
- [7] Wang Peng, Zhang Hao, Jia Yapeng, et al. Removal of the single point diamond turning marks by spiral sine trace bonnet polishing process [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20200212. (in Chinese)
- [8] Guo Xiaoguang, Wang Xiaoli, Kang Renke, et al. Influence of tool wear on cutting mechanism of single point diamond turning of silicon [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2020, 38(3): 355-362, 381. (in Chinese)
- [9] Mohammadi H, Poyraz H, Ravindra D, et al. An experimental study on single point diamond turning of an unpolished silicon wafer via micro-laser assisted machining [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1017: 175-180.
- [10] Zhang Haidong, Wang Xiaokun, Xue Donglin, et al. Surface testing method for ultra-large convex aspheric surfaces [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1147-1154. (in Chinese)
- [11] Chang Suping, Xie Tiebang, Dai Rong, et al. High-precision non-contact profile measurement for spherical surfaces and aspherical surfaces [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2005, 13(1): 151.
- [12] Xu Lingdi, Fang Anli, Yu Jianhai, et al. Ultrasonic-vibration assisted grinding of a zeroed freeform optical mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2564-2570. (in Chinese)
- [13] Jiang Ziyuan. Study on polishing trajectory planning and compliance control of optical mirror machining robot [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2021. (in Chinese)
- [14] Lin Zewen, Wang Zhenzhong, Huang Xuepeng, et al. Influence of robotic structural deformation on bonnet polishing removal function [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(5): 200293. (in Chinese)
- [15] Sigmund P. Theory of sputtering. I. sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets [J]. *Phys Rev*, 1969, 184(2): 383.
- [16] Li Wenqing, Zhang Jiyou, Wang Yonggang, et al. Evolution of full band errors in ion beam processing [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(5): 47-54. (in Chinese)
- [17] Wang Yonggang, Li Ang, Meng Xiaohui, et al. Thermal effect in ion beam figuring of optical mirror assembly [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(3): 72-78. (in Chinese)
- [18] Yang Qiushi, Zhang Jiyou, Yu Jianhai, et al. Research on error analysis of support deformation for large aperture space mirrors [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(3): 60-70. (in Chinese)
- [19] Wang Kejun, Dong Jihong, Zhou Pingwei, et al. Back support structure design of mirror of space remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0718004. (in Chinese)
- [20] Liu H, Zhu X, Kang R, et al. Three-point-support method based on position determination of supports and wafers to eliminate gravity-induced deflection of wafers [J]. *Precision Engineering*, 2016, 46: 339-348.