

文章编号 1004-924X(2011)04-0743-11

## Wolter-I 型掠入射反射镜的加工

王永刚<sup>1,2</sup>, 崔天刚<sup>1,2</sup>, 马文生<sup>1</sup>, 陈 斌<sup>1</sup>, 陈 波<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**针对 Wolter-I 型掠入射反射镜柱面内表面的特殊结构,研究了弹性球状小磨头以旋偏方式运动逐环带修正面形时的去除函数模型。分析了相关工艺参数,如磨头-工件旋转角速度比、旋偏角大小、磨头中心压强以及磨头和工件的趋近距离对去除函数的影响,通过实验获得了驻留时间和去除函数中心去除深度的关系。采取两步加工法控制研抛后的表面质量,分析表明:当磨头-工件角速度比为 1.41 时,反射镜的表面质量最好。介绍了计算机控制光学表面成形(CCOS)法加工 Wolter-I 型掠入射反射镜的过程。选择微晶玻璃为反射镜的镜胚,在自行研制的研抛设备上,以不同粒径的氧化铈作为抛光液,对金刚砂砂轮粗磨后的工件进行抛光。通过改变磨头相对工件的压入深度,获得不同大小的磨头去除区域,实现了对上一个抛光周期后的残留误差的有效去除。最终获得的反射镜面形精度为 PV:1.39  $\mu\text{m}$ , RMS:0.34  $\mu\text{m}$ , 圆度均方根误差优于 0.1  $\mu\text{m}$ 。实验结果表明:提出的两步法旋偏加工方案可用于掠入射反射镜的加工。

**关键词:**掠入射反射镜;柱面内表面;弹性球状小磨头;两步加工法;表面质量

**中图分类号:** TQ171.68 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0743

## Fabrication of Wolter-I grazing mirror

WANG Yong-gang<sup>1,2</sup>, CUI Tian-gang<sup>1,2</sup>, MA Wen-sheng<sup>1</sup>, CHEN Bin<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** For the special structure of cylindrical inner surface of a Wolter-I grazing mirror, the removal function of an elastic ball tool with deflected rotation motion was researched, and the relations between the max removal depth of removal function, dwell time and other parameters obtained by experiments were demonstrated. By using a 2-step method for polishing, it shows that when the ratio of rotating angle velocity to tool-workpiece is 1.41, the surface quality is in the best state. Furthermore, the fabrication of Wolter-I grazing mirror base on Computer Control Optical Surface(CCOS) was introduced. In the research, Zerodur glass was selected as mirror substrates and it was polished by CeO abrasive on a Digital Control(NC) platform developed by ourselves. By changing the distance between the tool and the workpiece, the removal functions in different contact areas were determined in the experiments, and the residual error from previous polishing process was corrected effectively. Using two kinds of measurement devices to outline the surface profile, it shows that the final surface figure of the mirror is 1.39  $\mu\text{m}$  (PV), 0.34  $\mu\text{m}$  (RMS) and the error of circularity is less than 0.1  $\mu\text{m}$  (RMS).

收稿日期:2010-03-31;修订日期:2010-05-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10878004)

These results demonstrate the feasibility of fabricating Wolter-I grazing mirror with the 2-step deflected rotation method.

**Key words:** grazing mirror; cylindrical inner surface; elastic ball tool; 2-step polishing method, surface quality

## 1 引言

进入空间时代,近地空间环境与人类的生活息息相关,而空间环境状态直接受太阳活动的影响和调制。当太阳耀斑爆发时,其 X 射线波段特征变化十分显著,因此观测太阳 X 射线的变化对研究太阳活动的形成、发生和发展具有重要价值。目前,许多国家相继在科研气象卫星上搭载了太阳 X 射线成像仪对太阳活动进行实时监测<sup>[1]</sup>。

X 射线具有波长短,能量大,容易穿透物质的特点,而且,所有材料在这个波段的正入射反射率都极低,即使采用多层膜技术,也无法满足实用化的要求。为了实现对 X 射线的聚焦成像,人们常采取掠入射结构的成像系统。在太阳软 X 射线-极紫外(EUV)波段复合型望远镜设计中,对于 0.4~6 nm 波段的成像采用了 Wolter-I 型掠入射结构,即由一个旋转抛物面和一个旋转双曲面组成同轴共焦系统光路<sup>[2]</sup>,通过两次反射,实现对 X 射线的聚焦成像。此结构可获得较高的成像分辨率。

传统的光学元件表面一般为平面或者小曲率的球面和非球面。磨头一般采用平转动或行星运动的方式来加工这些表面<sup>[3-6]</sup>。但对于 Wolter I 型掠入射反射镜特殊的近似柱面结构,磨头平转动或行星运动去除方式已不再适用,科学家们更多地是采用旋进方式来加工柱面内表面<sup>[9-13]</sup>。本文主要描述了计算机控制光学表面成形(CCOS)技术加工 Wolter-I 型掠入射反射镜的过程和工艺。在自研的研抛设备上,以不同粒径的氧化铈作为抛光液,对金刚砂砂轮粗磨后的工件进行抛光。通过改变磨头相对工件的压入深度,获得不同大小的磨头去除区域,实现对上一个抛光周期后的残留误差的有效去除。文中介绍了用于反射镜面形检测的设备,进行了抛光和检测试验,为进一步加工符合设计要求的入射反射镜奠定了基础。

## 2 Wolter-I 型掠入射反射镜的加工系统

根据反射镜柱面内表面的特殊结构,自研了一台数控研抛机,如图 1 所示。该机床由工件旋转主轴、工件平移机构、磨头二维平移机构、磨头旋转机构、面形在线检测系统、计算机控制系统组成。

整个系统采用花岗岩平台作为支撑台,以空气静压轴承作为工件回转轴。采用滚动直线导轨作为加工磨头运动驱动装置,以 PC1000 作为控制系统。空气静压轴承的轴向端跳动误差优于 3  $\mu\text{m}$ ,细分驱动后的滚动直线导轨的定位精度为 5  $\mu\text{m}$ 。

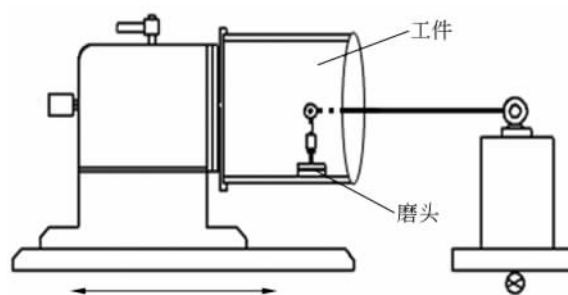


图 1 Wolter I 型掠入射反射镜数控研抛机

Fig. 1 NC platform for polishing Wolter I grazing mirror

## 3 加工 Wolter-I 型反射镜的去除函数

### 3.1 去除函数的建模

掠入射反射镜是由一个旋转抛物面和一个旋转双曲面组成的同轴共焦系统,抛光磨头为弹性球状小磨头。研磨后的反射镜在圆度上的误差满足公差需求,优于 RMS 为 0.1  $\mu\text{m}$ ,可以沿轴向逐环带的修正 Wolter I 型反射镜的面形。加工时

磨头作用在工件表面并压下一定深度,磨头以角速度为  $\omega_2$  自转运动,工件以角速度  $\omega_1$  转动。旋转中心轴与接触面中心点法向量间保持一定的角度(即旋偏角)。磨头与工件的接触面为曲面,如图 2 所示。

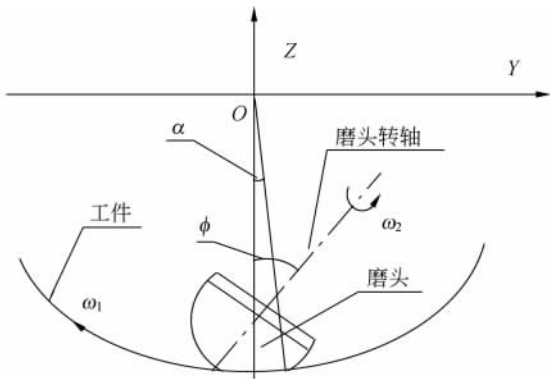


图 2 磨头作用工件的几何示意图

Fig. 2 Sketch of tool contacting with workpiece

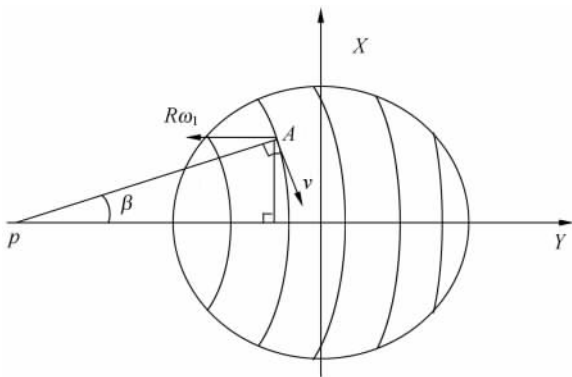


图 3 接触面上任一点速度合成示意图

Fig. 3 Velocity components overlaid on polishing spot

所以,描述光学表面去除比较成功的 Preston 方程应修正为三维形式:

$$\Delta R(x, y, z) = K \cdot p(x, y, z) \cdot v(x, y, z), \quad (1)$$

式中  $K$  为常数; $\Delta R(x, y, z)$ 为磨头与工件接触区域内任意点  $(x, y, z)$  单位时间内的材料去除量; $p(x, y, z)$ 为曲面上压力分布函数; $v(x, y, z)$ 曲面上速度分布函数。

为了讨论方便,将 Wolter-I 型结构的反射镜简化成柱面模型,磨头简化为球面模型。模型如下式所示:

球面方程:

$$x^2 + y^2 + (z+l)^2 = r^2, \quad (2)$$

柱面方程:

$$y^2 + z^2 = R^2, \quad (3)$$

其中, $r$ 为磨头半径, $R$ 为柱面半径, $l$ 为球心与柱面中心间距离。

根据 Hertz 接触理论,此时接触面上的压力分布  $p$  与磨头保持旋偏转动而工件不动情形下的结果一样,这在作者之前的工作中已经分析过<sup>[14]</sup>。

$$\left(\frac{p(x, y, z)}{p_0}\right)^n + f(x, y, z) = 1. \quad (4)$$

式中  $n$  为压力分布修正因子,根据不同的材料特性,可以由实验获得; $p_0$ 为中心压力; $f(x, y, z)$ 为接触面方程。

如果把工件和磨头的接触表面在 X-Y 坐标系中平铺展开,此时工件静止条件的磨头去除区域为一椭圆区域。工件转动时,可以理解成磨头在转动的同时沿着 Y 轴以速度  $R\omega_1$  做匀速直线运动。如图 3 所示。

由于工件为柱面内表面,在展平后的 X-Y 坐标系中考虑速度叠加问题是合理的。接触面上的等速线在以  $p$  点为圆心的圆弧上,对于任意点 A,磨头转动叠加工件转动的速度分布为:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{R^2 \omega_1^2 + h^2 \omega_2^2 + 2Rh\omega_1 \omega_2 \sin \beta}, \quad (5)$$

其中:

$$\tan \beta = \frac{x}{y + \sqrt{R^2 - x_0^2} / \tan \phi}, \quad (6)$$

又因为  $R\omega_1 = V_{\text{workpiece}} = \frac{dy}{dt}$ 。所以工件旋转一周的去层深度为:

$$\Delta = \kappa \int p v dt = \kappa \int_{-y_x}^{y_x} p_0 \sqrt{1 - f(x, y, z)} \cdot \sqrt{1 + \frac{h^2}{R^2} \rho^2 + \frac{2h}{R} \rho \sin \beta} dy, \quad (7)$$

其中  $\rho = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ ,表示磨头和工件的角速度比; $y_x$ 为对应于不同  $x$ ,磨头-工件接触区域沿 Y 轴的半宽度。

由此可以确定磨头在  $x_i$  处的特征去除函数即单位时间内去除深度随  $x$  的分布为:

$$\Delta R(x_i, x) = \Delta \cdot \omega_1 = \kappa \omega_1 \int_{-y_x}^{y_x} p_0 \sqrt{1 - f(x, y, z)} \cdot \sqrt{1 + \frac{h^2}{R^2} \rho^2 + \frac{2h}{R} \rho \sin \beta} dy, \quad (8)$$

根据加工实际情况,取  $n=1.6$ ,  $l=60.5$  mm,  $r=20$  mm,  $R=80$  mm,  $\omega_2=120$  r/min,  $\omega_1=80$  r/min,  $\Phi=25^\circ$ ,  $p_0$  为 22 个压力单位。利用式(8)模拟出在上述条件下的磨头去除函数,如图 4 所示。

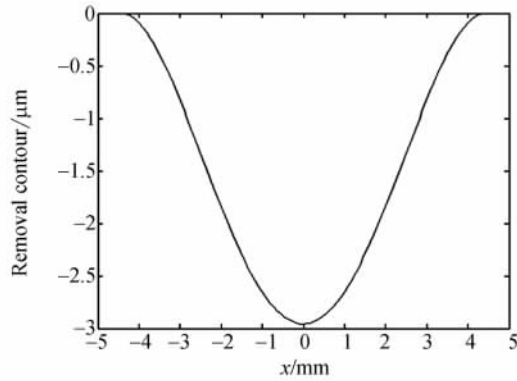


图 4 去除轮廓模拟图

Fig. 4 Simulated removal contour

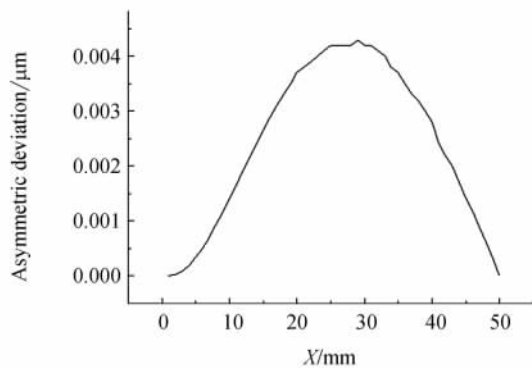


图 5 去除函数不对称偏差

Fig. 5 Asymmetric deviation of removal function

从图 4 看出建模得到的去除轮廓是一个完美的近似高斯分布函数,最大去除深度位置始终位于中心位置。将图 4 中的去除函数以横坐标零点为中心,以右边的曲线值减去对应的左边值,得到结果如图 5 所示。如果去除函数是对称的,那么会出现一条零直线。可是图中显示的是一条鼓包状的曲线,说明去除函数不是对称分布的。可以看出,这种不对称性偏差非常小,且随着  $\rho$  的增大而增大,一般情况下  $\rho$  取 0.5~1.5,通常为纳米量级,在实际加工中可以忽略这种偏差,认为去除函数具有对称性。

### 3.2 磨头去除函数的实验验证

本文选择筒状的微晶玻璃作为实验工件,粒径为 5  $\mu\text{m}$  的氧化铈作为抛光磨料。柱面内半径

为 80 mm,磨头半径为 20 mm。实验中工件和磨头的旋转角速度都为 80 r/min,磨头的旋偏角  $\Phi$  为  $25^\circ$ ,抛光 1 min 后,去除函数应为一圆环状的沟槽,测量其沿 X 轴的去除轮廓并对测量结果进行 5 次多项式拟合后,将实验测量值与理论模拟值相比较。如图 6 所示,实验值去除量最大值位于中心点位置,成近似高斯分布,实验值去除量最大值向 X 轴正方向稍稍偏移。通过计算获得两曲线标准偏差为  $\sigma=0.081222$   $\mu\text{m}$ ,其与最大理论去除率的比值为  $\kappa=\frac{\sigma}{\Delta R_{\max}}=2.8\%$ 。虽然二者有些许差别,但整体来看吻合度还是非常高的。这也直接验证了去除函数理论模型的准确性。

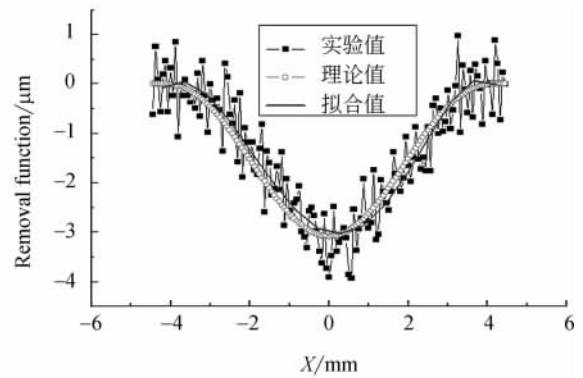


图 6 实验测得去除函数与理论计算值比较

Fig. 6 Comparison of experimental and theoretical results

为了建立加工去除特征函数库,分析了相关工艺参数对去除函数的影响,如磨头-工件旋转角速度比,旋偏角大小,磨头中心压强以及磨头和工件的趋近距离。这里每次分析都假设其他工艺参数不变,只改变要分析的工艺参数值。

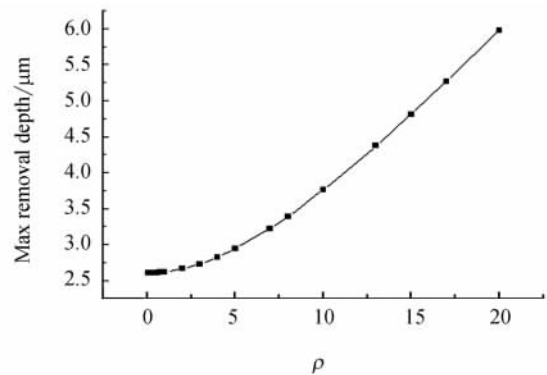


图 7  $\rho$  对去除函数的影响

Fig. 7 Effect of  $\rho$  on removal function

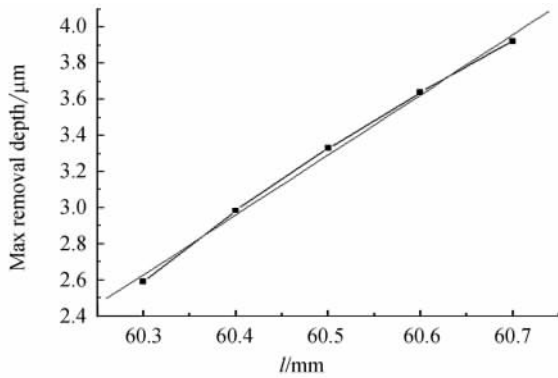


图 8  $l$  对去除函数的影响  
Fig. 8 Effect of  $l$  on removal function

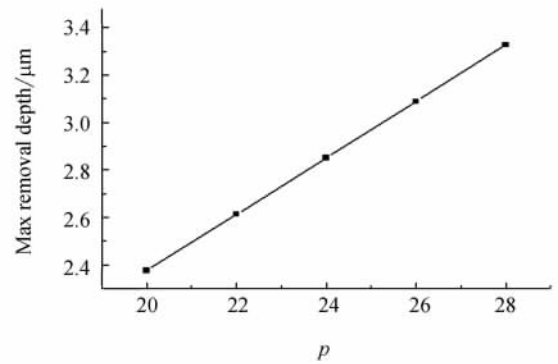


图 10 中心压力  $p_0$  对去除函数的影响  
Fig. 10 Effect of  $p_0$  on removal function

如图 7 所示,随着磨头-工件旋转角速度比  $\rho$  的增大,最大去除深度也跟着增大,但不是呈线性的关系。实际加工中, $\rho$  一般取 0.5~1.5,因此在这个范围内,近似的认为最大去除深度与  $\rho$  呈线性关系。图 8 所示为  $l$  对去除函数的影响,可以看出,在其他实验参数不变的条件下,随着  $l$  的增大,即磨头-工件的趋近距离的减小,去除函数的最大去除深度非线性的增加,同时去除宽度也逐渐增大。由于引入了两个变化量,这个参数不易控制,在一次抛光周期中已将其设置为定值。

图 9 显示了旋偏角对去除函数的影响,可以看出当  $\Phi$  为 15~35°时,最大去除深度的变化是非线性的,但是变化量非常小,所以去除函数变化也不大。因此,加工中对这个参数的要求不太严格,也就没必要对它进行优化。图(10)给出的是中心压力对去除函数的影响,随着中心压力的增大,最大去除深度也呈线性增大。在加工中,根据实际面形的需求选择相应的压力分布。

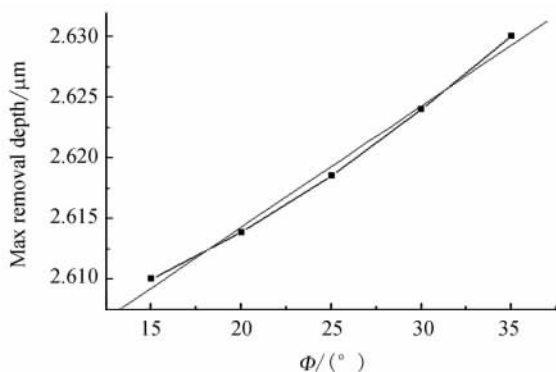


图 9 旋偏角对去除函数的影响  
Fig. 9 Effect of  $\Phi$  on removal function

另外,实验获得了去除函数的中心去除深度与驻留时间的关系,如图 11 所示。可以看出,去除函数近似符合高斯分布,且中心去除深度与驻留时间呈线性关系。因此,可以用 CCOS 法加工 Wolter-I 型掠入射反射镜,实现确定性材料去除。

#### 4 表面质量的控制

加工过程中,磨头和工件的相对运动会在表面留下一些加工痕迹,这种痕迹和压力分布无关,一般是由工件-磨头的速度轨迹分布决定的。常见的加工方法中,如磨头做平转动或行星运动,由于去除函数的速度轨迹成同心圆分布,所以对于工件上任一点 A,磨头在不同驻留点对其作用的合成速度为 0,所以加工后的工件具有很好的表面质量,呈现各向同性的特性,如图(12)所示。因此对于去除函数的速度成同心圆分布的加工过程,根本不需要考虑对其进行表面质量控制。

对于 Wolter-I 型反射镜的加工,由于磨头旋转轴和驻留点法线成一定得偏角,使得去除函数的速度轨迹分布不再成同心圆状,而是成同心圆弧状的分布,这种分布还与  $\rho$  相关,如图 13 所示。

文中测得了  $\rho=3.5$  时的表面局部形貌,如图 14 所示。从图中可以看出,工件表面有明显的划痕,划痕的方向和速度分布基本上一致,这也证明了表面划痕和压力无关,而主要与速度轨迹分布相关。如果不做任何改进的话,加工后的工件表面质量会很差,特别是在短波领域,这样的表面缺陷,会导致散射的急剧增加,影响成像质量。

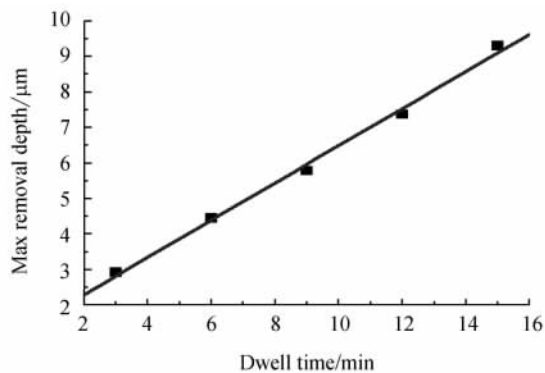


图 11 去除函数的中心去除深度与驻留时间的关系  
Fig. 11 Relation between max removal depth and dwell time

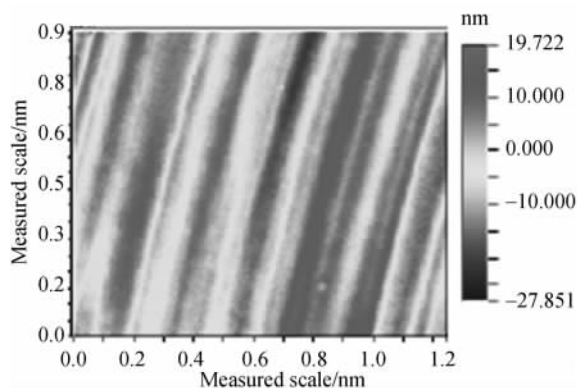


图 14 速度分布对表面质量的影响  
Fig. 14 Effect of velocity track on surface quality

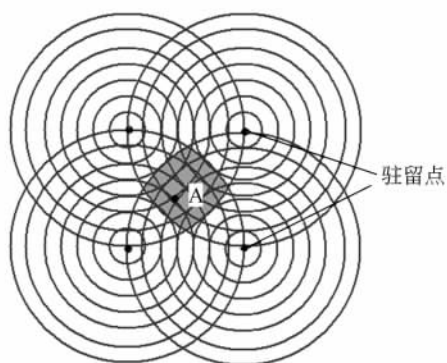


图 12 常见加工法中表面质量控制示意图  
Fig. 12 Sketch of surface quality control

磨头继续沿顺时针方向旋转,而工件则沿逆时针方向旋转。如果合成后速度矢量方向与 Y 轴成  $45^\circ$ ,如图 15 所示,则对于工件上任一点 A,磨头分别以旋偏角  $\Phi$  和  $-\Phi$  作用于 A 点的速度轨迹叠加如图 16 所示。

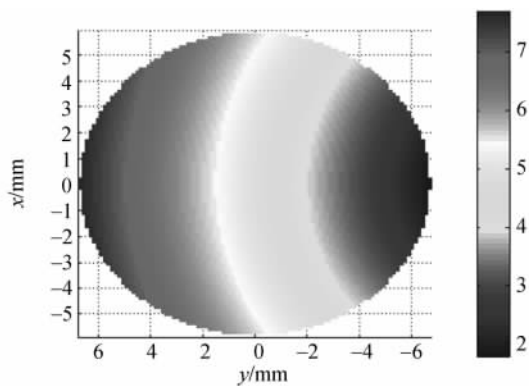


图 13 去除函数的速度分布  
Fig. 13 Velocity distribution of removal function

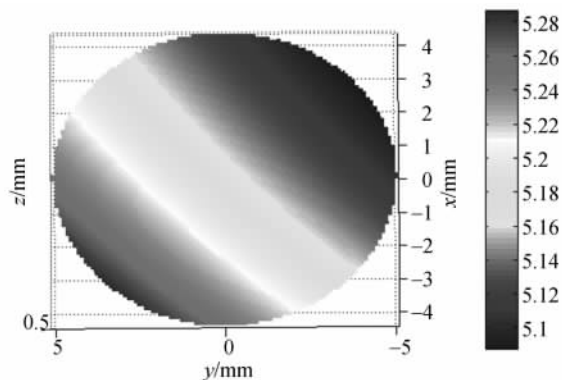


图 15 与 Y 轴成  $45^\circ$  的速度轨迹布图  
Fig. 15 Angle between velocity track and Y axis

为了改善这种情况,需要对加工过程中磨头的运动方式做适当的调整。我们采用两步法来开展实验,首先让磨头旋转轴和驻留点法线成一定角度  $\Phi$ ,磨头和工件都沿顺时针方向转动。然后,在同一驻留点磨头旋转轴和驻留点法线成  $-\Phi$ ,

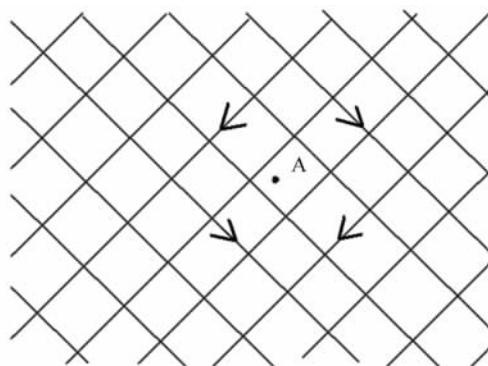


图 16 两步法抛光速度轨迹图  
Fig. 16 Velocity track overlaid of 2-step polishing

测量了两步抛光法后的表面质量,如图 17 所

示。可以看出,表面质量得到了极大的改善,表面上没有明显的划痕。

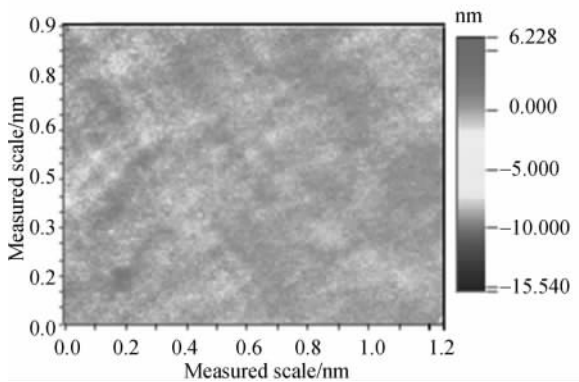


图 17 两步法加工后的表面质量  
Fig. 17 Surface quality by 2-step polishing

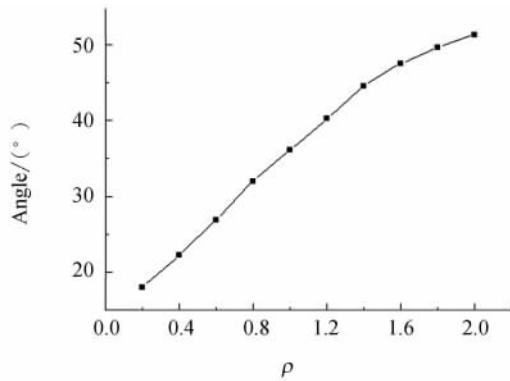


图 18  $\rho$  与速度轨迹方向-Y 轴夹角关系图  
Fig. 18 Dependence of  $\rho$  on angles between velocity track and Y axis

因此问题的关键就成为选择什么样的  $\rho$  才能使速度矢量方向与 Y 轴成  $45^\circ$ , 其实, 速度轨迹并不是如图 15 所示的那样是笔直的直线, 而是如图 13 所示有一定的弧度, 但是当  $l=60.5 \text{ mm}$ ,  $\Phi > 20^\circ$  时, 这个弧度很小, 可以近似看成直线, 经过计算, 我们得到了如图(18)所示的磨头-工件旋转速度比  $\rho$  和速度矢量方向与 Y 轴夹角关系图。从图中我们知道, 当  $\rho=1.41$  时, 夹角刚好为  $45^\circ$ , 这是我们加工中要保持不变的一个参数。

### 5 CCOS 法加工 Wolter-I 型掠入射反射镜

#### 5.1 CCOS 法加工过程

计算机控制光学表面成形技术(CCOS)是指根据定量的面形检测数据<sup>[15-16]</sup>, 在加工控制模型的基础上, 用计算机控制一个小磨头对光学零件进行研磨或抛光, 通过控制磨头在工件表面的驻留时间及磨头与工件间相对压力来控制材料的去除量。

#### 5.2 Wolter-I 型反射镜的加工

以 MSG-325 型两轴数控单点金刚石车床为数控平台, 用粒径为  $5 \mu\text{m}$  的金刚砂轮对反射镜进行了轨迹成型。研磨后的反射镜在圆度上的误差满足公差需求, 优于  $\text{RMS}: 0.1 \mu\text{m}$ , 误差主要沿母线即 X 方向分布。用接触法的电感测微仪测得工件的初始面形精度为  $\text{PV}: 8.58 \mu\text{m}$ ,  $\text{RMS}: 2.9 \mu\text{m}$ 。测量中由于信号噪声的影响, 轮廓中出现较大的毛刺。为了更好地实现 CCOS 加工, 这里对其进行了低频拟合处理, 如图 19 所示, 对其后测量的结果也采取相同的处理方法。

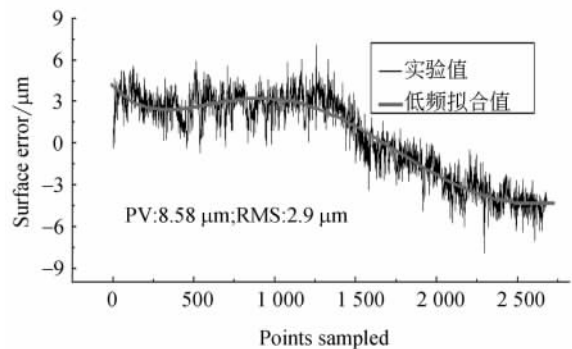


图 19 掠入射反射镜面形初始误差  
Fig. 19 Initial surface error of grazing mirror

根据初始面形误差值, 选定粒径为  $1 \mu\text{m}$  的氧化铈作为抛光磨料。磨头为半径为  $20 \text{ mm}$  的弹性球状磨头, 反射镜半径为  $(80 \pm 6) \text{ mm}$ 。为了避免边缘效应, 反射镜两端加上用同样材料做成的保护环片, 每个环片长度应大于磨头与工件接触面的在 X 轴上的长度。保护环片在加工和测试中无需取下, 直至加工检测过程全部结束。加工时, 磨头先修正第  $i$  个环带的面形误差, 修正好后, 磨头进给到下一个环带  $i+1$  修正面形。反复如此, 直至反射镜的面形精度符合要求, 如图 20 所示。旋转中心轴与接触面中心点法向量的夹角即旋进偏角保持一定的角度(一般取  $20^\circ$ )。

在抛光加工的初始阶段, 低频误差占主要成分, 因此通过减小磨头和工件接触压入深度来减

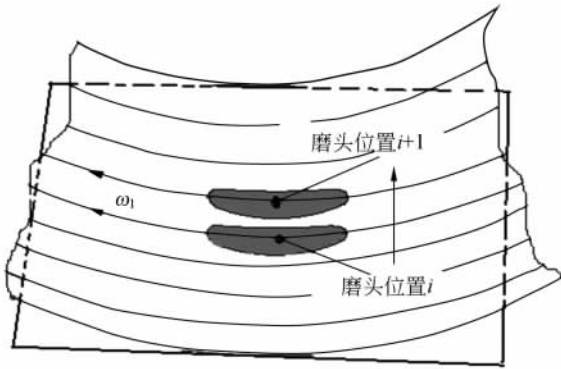


图 20 磨头逐环带修正面形示意图

Fig. 20 Sketch of tool correcting surface form by each zone

小去除面积,提高磨头的旋转速度,以提高去除效率,增强对局部误差的修正能力。在这个过程中不需要更换磨头,以便提高效率,降低成本。加工实践表明:较小的去除面使磨头能够跟踪工件面形的变化趋势,更好地修正局部误差,使工件表面形状精度在较短时间内达到规定指标,但由它产生的表面波纹度比较明显,从而引入表面的中高频误差,产生高级像差。因此,在此抛光加工循环结束后,需增大磨头和工件接触压入深度,提高磨头与工件表面的工作面积,重新修整抛光工艺参数,有效地消除表面残差。

具体操作时可首先根据所测母线方向上的误差分布,利用编制的基于离散矩阵法的驻留时间求解算法计算出磨头在各驻留点的驻留时间<sup>[17-18]</sup>。然后,按照两步法要求,先将计算所得的驻留时间除以 2,让磨头先以第一步方式以原先驻留时间的一半抛光一个周期,接着再以第二步方式以原先驻留时间的 1/4 抛光一个周期,依次

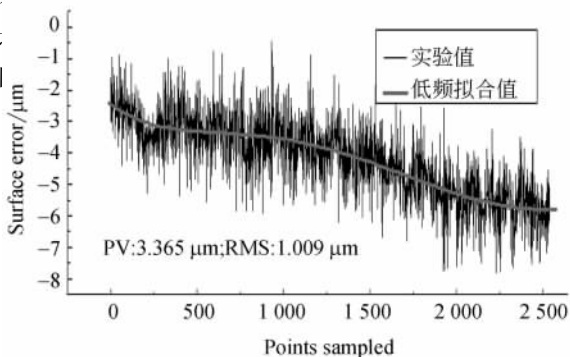


图 21 一次迭代加工后的面形误差

Fig. 21 Tested results of surface after the first polishing period

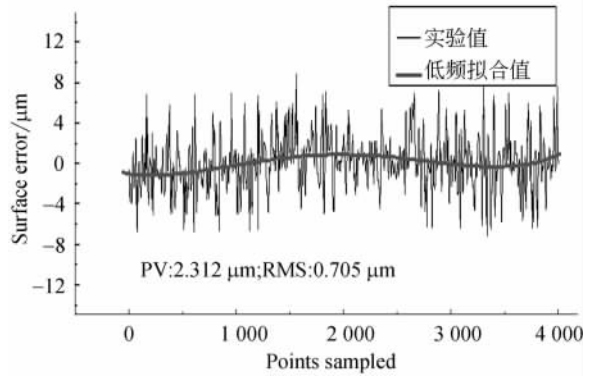


图 22 二次迭代加工后的面形误差

Fig. 22 Tested results of surface after the second polishing period

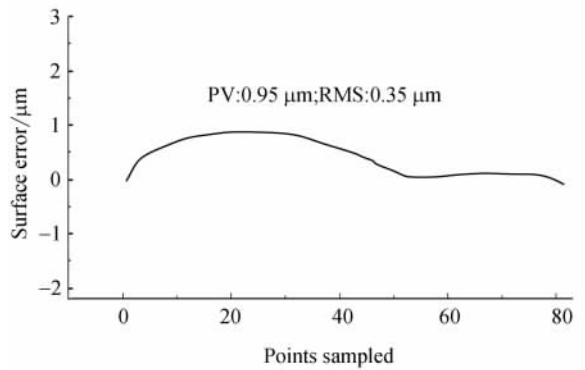


图 23 三次迭代加工后的面形误差

Fig. 23 Tested results of surface after the third polishing period

(21)、(22)和(23)所示,可见面形精度得到了快速的收敛。

### 5.3 加工结果

在自研的研抛机上,经过 81 h 的抛光,初步加工出如图(24)所示的掠入射反射镜。用自研的 Wolter-I 型旋转非球面反射镜面形检测装置对反射镜内表面进行检测<sup>[19-20]</sup>。每条母线间隔 0.5 mm 采样,每隔 15°扫描一条母线,共 24 线。测量结果如图(25),(26)所示。反射镜的面形精度为 PV:1.39 μm, RMS:0.34 μm。在母线不同位置测得镜面 5 条圆周曲线,圆度值均方根误差分别为 0.09,0.07,0.05,0.07,0.05 μm,远大于反射镜在圆度上的公差需求(即优于 RMS:0.5 μm),



这也验证了选择只考虑沿母线方向的误差分布, 逐环带的修正面形误差的正确性, 为进一步加工符合设计要求的掠入射反射镜奠定了基础。

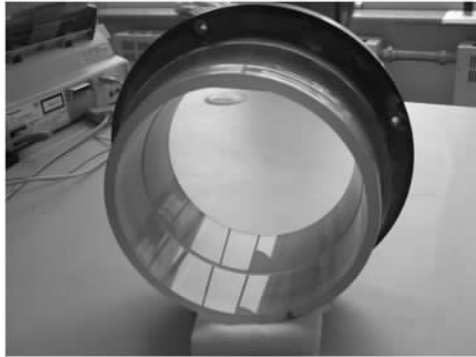


图 24 Wolter I 型掠入射反射镜实物图

Fig. 24 Wolter-I grazing mirror manufactured in lab

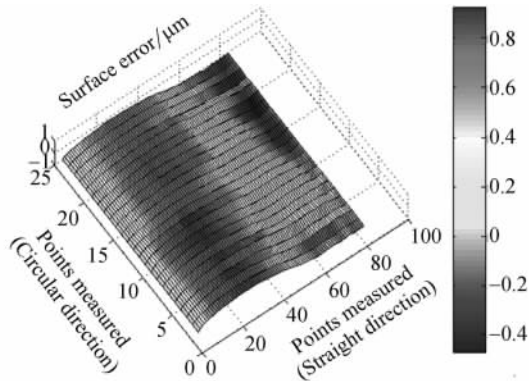


图 25 加工后最终面形误差

Fig. 25 Final surface error after polishing

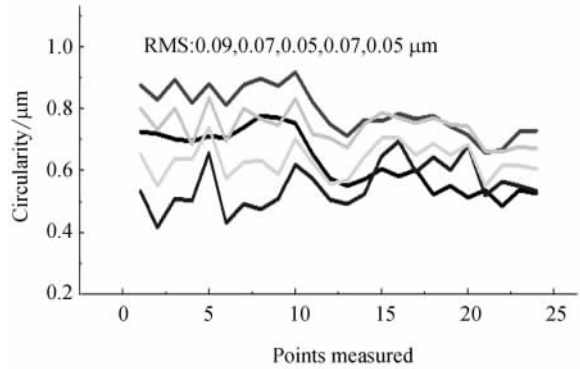


图 26 掠入射反射镜圆度误差分布

Fig. 26 Error of circularity of Wolter Type I grazing mirror

### 6 结 论

在太阳软 X 射线-极紫外(EUV)波段复合型望远镜设计中, WOLTER-I 型掠入射望远镜的核心技术之一为筒状旋转非球面的制造。针对 Wolter-I 型掠入射反射镜柱面内表面的特殊结构, 研究了磨头以旋进方式运动时的磨头去除函数, 建立了去除函数理论模型。通过实验获得了驻留时间和去除函数中心去除深度的关系。介绍了 CCOS 法加工 Wolter-I 型掠入射反射镜的过程。选择微晶玻璃为反射镜的衬底材料, 在自研的研抛设备上, 以不同粒径的氧化铈作为抛光液, 对金刚砂砂轮粗磨后的工件进行抛光。研抛的不同阶段, 分别用接触法的电感测量仪和非接触法的长程轮廓测量仪(LTP)测量反射镜面形误差, 最终得到的反射镜面形精度为 PV: 1.39 μm, RMS: 0.34 μm, 圆度均方根误差优于 0.1 μm。结果表明: 提出的加工方法在工程中完全可行, 为进一步加工符合设计要求的掠入射反射镜奠定了基础。

### 参考文献:

[1] LEMEN J R, DUNCAN D, EDWARDS C, et al. Solar X-Ray Imager for GOES [J]. SPIE, 2004, 5171:65-76.

[2] 陈波, 陈淑妍, 巩岩. 一种复合型空间软 X 射线-极紫外波段望远镜设计[J]. 光学技术, 2004, 30(2): 242-244.

CHEN B, CHEN SH Y, GONG Y. Design of a compound soft X-ray and EUV telescope [J]. Optical Technique, 2004, 30(2): 242-244. (in Chinese)

[3] 王权陡, 余景池, 张峰. 数控抛光中不同运动方式下小抛光盘抛光特性之比较 [J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 73-79.

WANG Q D, YU J CH, ZHANG F. Polishing performance comparison of small polishing pad worked

- in different motion model in computer controlled optical polishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5):73-79. (in Chinese)
- [4] 王旭,张学军.固着磨料加工碳化硅反射镜的微观理论模型[J]. 光学精密工程,2009,17(3):513-518.  
WANG X, ZHANG X J. Micro theoretical model for grinding SiC mirror with fixed abrasive [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):513-518. (in Chinese)
- [5] 王旭,张峰,张学军.固着磨料抛光碳化硅反射镜的去除函数[J]. 光学精密工程,2009,17(5):951-957.  
WANG X, ZHANG F, ZHANG X J. Removal function of computer controlled polishing SiC mirror with fixed abrasive [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):951-957. (in Chinese)
- [6] 王旭,张学军,徐领娣,等.固着磨料加工碳化硅反射镜的实验[J]. 光学精密工程,2009,17(4):771-777.  
WANG X, ZHANG X J, XU L D, et al.. Experiment of grinding SiC mirror with fixed abrasive [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4):771-777. (in Chinese)
- [7] YACOBS S D. International innovations in optical finishing [J]. *SPIE*, 2004, 5523:264-272.
- [8] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, BROOKS D, et al.. Novel CNC polishing process for control of form and texture on aspheric surfaces [J]. *SPIE*, 2002, 4767:99-105.
- [9] KIM D W, KIM S W. Novel simulation technique for efficient fabrication of 2m class hexagonal segments for extremely large telescope primary mirrors [J]. *SPIE*, 2005, 5638:48-59.
- [10] KIM D W, PARK W H, KIM S W, et al.. Parametric modeling of edge effects for polishing tool influence functions [J]. *Optics Express*, 2009, 17(7):5656-5665.
- [11] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, BINGHAM R G, et al.. The precessions process for efficient production of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation [J]. *SPIE*, 2003, 4842:73-84.
- [12] KIM D W, KIM S W. Static tool influence function for fabrication simulation of hexagonal mirror segments for extremely large telescopes [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3):910-917.
- [13] WALKER D D. The 'Precessions' tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces [J]. *Optics Express*, 2003, 11(8):958-964.
- [14] 王永刚,崔天刚,马文生,等.弹性球状小磨头加工 Wolter I 型掠入射反射镜的去除函数[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1):10-16.  
WANG Y G, CUI T G, MA W SH, et al.. Removal function for fabrication of Wolter I grazing mirror by elastic ball tool [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1):10-16. (in Chinese)
- [15] JONES R A, RUPP W J. Rapid optical fabrication with computer-controlled optical surfacing [J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(12):1962-1968.
- [16] JONES R A, RUPP W J. Rapid optical fabrication with CCOS [J]. *SPIE*, 1990, 1333:34-43.
- [17] LEE H C, YANG M Y. Dwell time algorithm for computer-controlled polishing of small axis-symmetrical aspherical lens mold [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(9):1936-1943.
- [18] EUGENE W. Cylindrical optic figuring dwell time optimization [J]. *SPIE*, 2000, 4138:25-32.
- [19] 崔天刚,王永刚,马冬梅,等. Wolter I 型反射镜面形在线检测装置设置[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8):1801-1806.  
CUI T G, WANG Y G, MA D M, et al.. Design of surface profile online measuring device used for Wolter Type I mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1801-1806. (in Chinese)
- [20] YELLOWHAIR J, BURGE J H. Analysis of a scanning pentaprism system for measurements of large flat mirrors [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(35):8466-8474.

## 作者简介:



王永刚(1982—),男,江苏盐城人,博士研究生,主要从事光学加工及表面检测的研究。E-mail: vangernh@126.com



陈斌(1958—),男,辽宁沈阳人,高级工程师,于吉林工业大学继续教育学院机械制造工艺与设备专业获得工学学士学位,主要从事超精密加工工艺的研究。chenbin5812@yahoo.com



崔天刚(1983—),男,山东济南人,博士研究生,主要从事光学设计及非球面表面检测的研究。E-mail: foreverctg@163.com



陈波(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984于吉林大学获得学士学位,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事软X射线极紫外波段光学和空间光学的研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn



马文生(1949—),男,吉林磐石人,高级工程师,于长春光机学院继续教育学院机械制造工艺与设备专业获得工学学士学位,主要从事超精密加工工艺的研究。439304194@qq.com

(本栏目编辑:严寒)

## ●下期预告

## 太阳辐照 FAST 温度场研究

宋立强,王启明,郭永卫

(中国科学院 国家天文台,北京 100012)

为了掌握 500 m 口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope, FAST)在太阳辐照下的温度分布,弱化 FAST“太阳灶”问题,保护馈源舱内相关仪器等,进行了太阳辐照 FAST 温度场研究,包括太阳相关参数研究、“太阳灶”问题解析及热流计算、台址地貌对 FAST 的日光遮挡及不同工况下的 FAST 温度分布等。结果表明,FAST 馈源舱温度分布不仅与反射面反射率、孔隙率、时间有关,而且与馈源舱防护罩的反射率、材料、焦舱位置、微波入口直径等因素有关;当反射面反射率为 0.2、孔隙率为 0.4 时,馈源舱最高温度为 47.56 °C,时间约在 12:00;同时计算出了形成太阳灶的时间域;在反射面最高温度达到 68.34 °C 时,时间在 14:00,此时与反射面最低温度 35.03 °C 有 33.31 °C 的温差;另外,为 FAST 相关设计及使用提出了意见和建议。研究表明,进行 FAST 温度场研究不仅掌握了不同工况下 FAST 温度分布,也为 FAST 相关结构与仪器的设计及使用提供了参考,具有一定的现实意义及应用价值。