

磁流变抛光二次非球面工件位置对刀校正

张瑜 张峰 郭芮 苏瑛 张云龙 许增奇 王阜超

Tooling calibration of secondary aspheric workpiece position in magneto-rheological polishing

ZHANG Yu, ZHANG Feng, GUO Rui, SU Ying, ZHANG Yunlong, XU Zengqi, WANG Fuchao

引用本文:

张瑜, 张峰, 郭芮, 等. 磁流变抛光二次非球面工件位置对刀校正[J]. 应用光学, 2022, 43(3): 518–523. DOI: 10.5768/JAO202243.0305002

ZHANG Yu, ZHANG Feng, GUO Rui, et al. Tooling calibration of secondary aspheric workpiece position in magneto-rheological polishing[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(3): 518–523. DOI: 10.5768/JAO202243.0305002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0305002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于散粒磨料振动抛光非球面加工技术研究

Aspheric machining technology based on vibration polishing of loose abrasive grains

应用光学. 2017, 38(1): 89–93 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0105003>

基于奇偶函数法的绝对检测实验研究

Absolute test of flats based on even or odd functions

应用光学. 2017, 38(3): 469–475 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0303007>

离轴非球面零位补偿检验的非线性畸变校正

Nonlinear distortion correction in off-axis aspheric null compensation tests

应用光学. 2019, 40(4): 638–643 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0403002>

高分辨率长焦广角低畸变光学成像系统设计

Design of optical imaging system with high resolution, long-focus, wide angle and low distortion

应用光学. 2017, 38(5): 725–731 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0501008>

特大非球面度离轴非球面补偿器结构设计与装调

Structure design and assembling of compensator for off-axis aspheric surface with large asphericity

应用光学. 2017, 38(4): 639–643 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0405003>

激光跟踪仪检测大口径非球面方法研究

Research on detection method of large-aperture aspheric surface by laser tracker

应用光学. 2021, 42(2): 299–303 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 03-0518-06

磁流变抛光二次非球面工件位置对刀校正

张 瑜, 张 峰, 郭 芮, 苏 瑛, 张云龙, 许增奇, 王阜超

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 近年来, 磁流变抛光作为一种确定性加工方法已成为获得高精度非球面的重要手段。作者以回转对称二次抛物面为例, 分析了磁流变抛光中使用抛光轮校正工件位置的理论方法, 并通过实验在 $\Phi 230$ mm 熔石英样件上验证对刀理论, 分别在 X 方向和 Y 方向以少于 3 次的调整次数校正工件位置, 实现了 X 方向、 Y 方向偏置量均低于 0.009 mm; 采用磁流变抛光技术对工件进行了修形实验验证, 加工后面形精度 RMS 由 $\lambda/7$ 收敛至 $\lambda/40$ 。实验结果表明: 作者提出的非球面工件位置对刀校正方法简单、可靠, 能够很好地对工件进行精确定位, 利于高精度非球面磁流变抛光加工。

关键词: 非球面; 磁流变抛光; 对刀校正; 面形精度

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202243.0305002

Tooling calibration of secondary aspheric workpiece position in magneto-rheological polishing

ZHANG Yu, ZHANG Feng, GUO Rui, SU Ying, ZHANG Yunlong, XU Zengqi, WANG Fuchao

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In recent years, the magneto-rheological polishing as a deterministic processing method has become an essential way to obtain the high-precision aspheric surfaces. Take the rotationally symmetric secondary paraboloid as an example, the theoretical method of using the polishing wheel to calibrate the workpiece position in magneto-rheological polishing was analyzed, and the experimental verification was carried out on a $\Phi 230$ mm fused quartz workpiece. The workpiece position was calibrated with less than 3 times of adjustment in the X direction and Y direction, respectively, and the offset in both X direction and Y direction was lower than 0.009 mm, respectively. The surface polishing experiment was conducted by magneto-rheological polishing technology on the workpiece, and the root-mean-square (RMS) of surface shape was converged from $\lambda/7$ to $\lambda/40$ after processing. The experimental results show that the proposed tooling calibration method of aspheric workpiece position is simple and reliable, which can accurately locate the workpiece and conducive to magneto-rheological polishing processing for high-precision aspheric surface.

Key words: aspheric surface; magneto-rheological polishing; tooling calibration; surface shape accuracy

引言

非球面光学元件能够以较少的光学元件有效校正像差、改善像质、扩大视场、增大作用距离、减少光能损失, 进而获得高品质的图像效果和光学特性, 同时可缩短系统总体长度, 并减小系统质量, 因而在航空航天、国防军工以及高科技民用领域的应用需求日益增长^[1-4]。其中二次非球面由于

加工工艺稳定, 检测手段成熟, 能够满足各种型号任务的工程化应用需求^[5-7]。磁流变抛光作为一种确定性加工方法, 具有去除函数稳定、加工精度高、加工表面质量高和表面修形能力强等优势, 能够加工玻璃、熔石英、蓝宝石和硒化锌等材质的光学元件, 近年来在高精度非球面光学元件加工领域得到广泛应用^[8-12]。

收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2021-12-18

基金项目: 国防基础科研项目 (JCKY2020208B021)

作者简介: 张瑜 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事先进光学元件加工及检测技术研究。E-mail: 18810577650@163.com

使用磁流变抛光技术加工高精度非球面光学元件,理想情况下工件完成定位夹紧后,机床坐标系下抛光轮最低点在工件特征点的正上方,因此工件必须精确定位。磁流变抛光加工工件位姿的精确确定由对刀工艺实现,包括调平、找正和对刀3个环节。传统的定位方式利用百分表或千分表及工装对工件手动进行精确调平及找正,之后使用高精度位移传感器或精密测头测量工件位姿,计算工件几何特征点坐标,进而建立加工工件坐标系^[13-15]。使用高精度位移传感器和精密测头对刀时需要转换抛光轮最低点和测头的位置关系,本文以二次回转对称抛物面为例,研究使用“刀具”即抛光轮对刀找正工件位姿的简易方法。

1 对刀原理

二次曲线一般方程如下式所示^[16]:

$$Z = \frac{cX^2}{1 + \sqrt{1 - (1+K)c^2X^2}} \quad (1)$$

式中: c 为顶点曲率; K 为二次曲线常数。当 $K = -1$ 时,曲线为抛物线,方程如下:

$$Z = \frac{cX^2}{2} \quad (2)$$

理想情况下,建立的二次回转对称非球面工件特征点的工件坐标系与机床坐标系在 origin 位置 XOY 平面平行, XOZ 、 YOZ 平面重合。机床坐标系下工件二次回转对称抛物面方程为

$$Z = \frac{c}{2}(X^2 + Y^2) + h \quad (3)$$

实际使用手动方式对工件精确调平及找正后,工件位置相比理想位置在 X 方向和 Y 方向均有一定的偏置量,如图 1(a) 所示。图 1(a) 中虚线为工件理想位置,实线为工件实际位置,一般认为非球面的顶点为特征点。该位姿时在机床坐标系下工件非球面方程为

$$Z = \frac{c}{2}[(X-a)^2 + (Y-b)^2] + h \quad (4)$$

式中: a 为工件 X 方向偏置量; b 为工件 Y 方向偏置量。

机床坐标系下取 $y=0$ 平面与 (4) 式二次回转对称抛物面相交,见图 1(a) 所示,截面曲线如图 1(b) 所示。

下面分析工件 X 方向偏置。实际工件位置截面曲线方程为

$$\begin{cases} Z = \frac{c}{2}[(X-a)^2 + b^2] + h \\ y = 0 \end{cases} \quad (5)$$

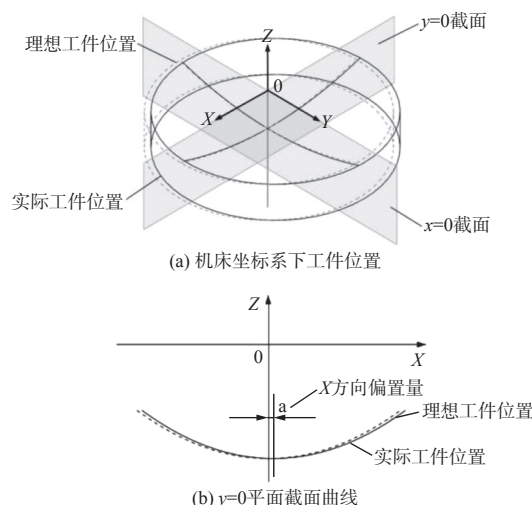


图 1 工件偏置分析

Fig. 1 Analysis of workpiece offset

本文使用抛光轮对刀校正工件位置。机床的抛光轮可在 Z 轴升降、 Y 轴平移、 A 轴和 B 轴旋转运动,工件可在 X 轴平移和 C 轴旋转运动。假设工件到达理想位置后(如图 2 中虚线),生成磁流变抛光加工程序,在加工程序中任取 $y=0$ 截面上一点,在保证抛光轮 Z 方向安全距离前提下,驱动机床运行达到该点,满足除 Z 坐标之外的其余坐标值,工件沿 X 轴运动距离为 d_1 。图 2 中实线为工件实际位置,工件截面曲线方程为

$$Z = \frac{c}{2}[(X-a+d_1)^2 + b^2] + h \quad (6)$$

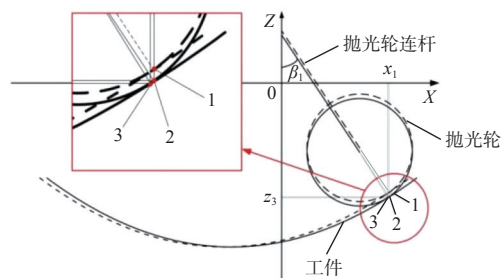


图 2 对刀取点位置 1

Fig. 2 Tooling setting position 1

数控加工时,抛光轮连杆方向为抛光轮与工件表面接触点法向方向,接触点为图 2 中点 1(X_1, Z_1)。由于工件实际位置发生偏置,抛光轮仍与工件表面相切,切点在抛光轮上发生变化,实际接触点为图 2 中点 3(X_3, Z_3),且点 3 法向与抛光轮连杆方向产生偏转。图 2 中点 2(X_2, Z_2)为 $X = X_1$ 时工件截面曲线上的点。

手动驱动抛光轮沿 Z 轴运动到工件表面,见图 2 所示,通过厚度均匀的柔性塞尺判断抛光轮是否刚好接触工件表面。记录该点在机床坐标系下

Z 坐标值 Z_3 , 抛光轮连杆长度为 L , 抛光轮半径为 r , 抛光轮连杆与 Z 轴夹角为 β_1 , 该点在机床坐标系下 X 坐标值为 $X_1 = (L+r)\sin\beta_1$ 。分析图 2 中点 3 与点 2 的坐标关系, 则 (6) 式的全微分方程如下:

$$dz = c(X-a+d_1)dx \quad (7)$$

图 2 中点 2 与点 1 的 X 坐标值相同, 即 $X_2 = X_1$ 。当工件截面曲线上点 2 发生变化, 即 ΔX_2 移动至点 3 时, Z 坐标产生的变化近似值为

$$\Delta Z_2 = c(X_1 - a + d_1)\Delta X_2 \quad (8)$$

分析抛光轮位于图 2 中虚线所在位置时的圆方程, 如下式所示:

$$(X-m)^2 + (Z+n)^2 = r^2 \quad (9)$$

式中: $m = L\sin\beta_1$ 。由于工件的偏置引起抛光轮沿 Z 方向平移变化, 移动到图 2 中实线所示位置, 此时圆方程为

$$(X-m)^2 + (Z+n+p)^2 = r^2 \quad (10)$$

式中 p 为圆心沿 Z 轴的移动量。方程 (10) 的全微分方程为

$$2(X-m)dx + 2(Z+n+p)dz = 0 \quad (11)$$

由于表示抛光轮的圆和工件截面曲线在点 3 相切, 则两曲线在该点切线相同。将该点坐标 (X_3, Z_3) 代入 (7) 式和 (11) 式, 可得:

$$Z_3 + n + p = \frac{m - X_3}{c(X_3 - a + d_1)} \quad (12)$$

将 (12) 式代入 (10) 式, 并整理可得:

$$c^2(X_3 - m)^2(X_3 - a + d_1)^2 + (X_3 - m)^2 - c^2r^2(X_3 - a + d_1)^2 = 0 \quad (13)$$

通过 (13) 式可得 X_3 与偏置量 a 的关系, 进一步可得 $\Delta X_2 = X_3 - X_1$ 。由于点 3 在工件截面曲线上, 满足 (6) 式关系, 则有:

$$Z_3 = \frac{c}{2} \{ [(L+r)\sin\beta_1 + \Delta X_2 - a + d_1]^2 + b^2 \} + h \quad (14)$$

同理, 在加工程序中另取一点, 驱动机床运动至指定位置, 如图 3 所示。工件沿 X 轴运动距离为 d_2 , 工件截面曲线方程如下所示:

$$Z = \frac{c}{2} [(X - a - d_2)^2 + b^2] + h \quad (15)$$

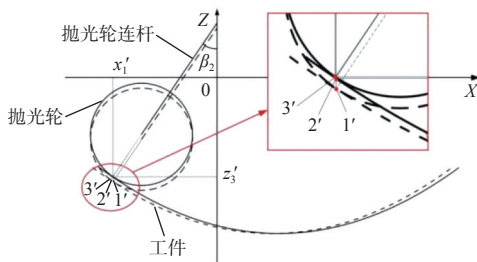


图 3 对刀取点位置 2

Fig. 3 Tooling setting position 2

手动驱动抛光轮沿 Z 轴运动到工件表面, 记录该点机床坐标系下 Z 坐标 Z'_3 , 则该点机床坐标系下 X 坐标 $X'_1 = -(L+r)\sin\beta_2$ 。

经过与对刀位置 1 相同的分析, 可得到 X_3 与偏置量 a 的关系, 如 (16) 式所示, 进而可得 $\Delta X_2 = X'_3 - X'_1$ 。

$$c^2(X_3 + m)^2(X_3 - a - d_2)^2 + (X_3 + m)^2 - c^2r^2(X_3 - a - d_2)^2 = 0 \quad (16)$$

由于点 3' 在工件截面曲线上, 满足 (15) 式关系, 则有:

$$Z_3 = \frac{c}{2} \{ [-(L+r)\sin\beta_2 + \Delta X_2 - a - d_2]^2 + b^2 \} + h \quad (17)$$

当工件 X 方向偏置 $a = 0$ 时, (14) 式和 (17) 式中 ΔX_2 和 $\Delta X'_2$ 均为 0。实际工件经过调平和找正后, 偏置量 a 在 0.1 mm 级别且通常 $a < 1$ mm。考虑 (13) 式和 (16) 式求解复杂且存在多个解, 通过选定工件并设定对刀位置, 分别给定 a 值, 如表 1 所示。使用代入的方法可分别求出对应的 X_3 , 进而求出对应的 ΔX_2 。

由表 1 可看出, 当 $|a| \leq 1$ 时, ΔX_2 与 a 近乎为等比例关系, 比例因子 κ 值恒定。则 (14) 式中 ΔX_2 可表示为

$$\Delta X_2 = \kappa a \quad (18)$$

对于指定的非球面工件, 当选定其对刀位置后, 可通过令 $a = 1$, 将其他对刀位置相关数据代入 (13) 式中求出 X_3 , 再结合 $\Delta X_2 = X_3 - X_1$ 与 (18) 式, 即可求出 κ 值。

若对刀取点位置 1 和 2 为对称位置, 则满足:

$$d_1 = d_2 \quad (19)$$

$$\beta_1 = \beta_2 \quad (20)$$

同时也满足 (14) 式和 (17) 式中 $\Delta X_2 = \Delta X'_2 = \kappa a$, 再结合 (19) 式和 (20) 式可求得偏置量 a , 如下式所示:

$$(1 - \kappa)a = \frac{Z_3' - Z_3}{2c[(L+r)\sin\beta_1 + d_1]} \quad (21)$$

使用同样的方法可求出 Y 方向的偏置量 b , 如下式所示:

$$(1 - \varepsilon)b = \frac{Z_3' - Z_3}{2c[(M+r)\sin\alpha_1 + f_1]} \quad (22)$$

式中: M 为 Y 方向连杆长度; α_1 为抛光轮连杆与 Z 轴夹角; f_1 为工件沿 Y 轴运动距离; ε 为 Y 方向偏置量 b 引起的 ΔY_2 与 b 的比例因子。

使用抛光轮校正工件位置的对刀方法, 定位精度主要受工件调平找正误差、测量误差以及非球面几何误差影响。本文采用常用的找正和调平方

表 1 ΔX_2 与 a 的关系

Table 1 Relationship between ΔX_2 and a

序号	c	L/mm	$\beta_1/(\text{^\circ})$	r/mm	d_1/mm	a/mm	$\Delta X_2/\text{mm}$	$\Delta X_2/a$
1	0.0024888	150	15.3106	100	43.9396	1	-0.288	-0.288
						0.5	-0.144	-0.288
						0.1	-0.0288	-0.288
						0.01	-0.00288	-0.288
						-1	0.287	-0.287
2	0.002192	150	13.5188	100	51.0252	1	-0.253	-0.253
						0.5	-0.126	-0.252
						0.1	-0.0252	-0.252
						0.01	-0.00252	-0.252
						-1	0.252	-0.252
3	0.002641735	150	11.2069	100	26.3737	1	-0.333	-0.333
						0.5	-0.166	-0.332
						0.1	-0.0332	-0.332
						0.01	-0.00332	-0.332
						-1	0.332	-0.332

式定位工件,控制了工件的倾斜误差。机床运动轴带动抛光轮与工件表面刚好接触时,机床的定位误差以及接触状态的判定形成的随机测量误差,可通过重复测量的方式降低误差影响。在对刀理论的实际应用中,发现同一工件在完成一次调平、找正和对刀后,经过离线检测再次加工时,只需要进行调平和找正便可完成定位。证明了非球面的几何误差为固有误差,通过精密铣磨成形、研磨和三坐标测量等加工和检测手段可降低该误差影响,也可通过偏置量计算方法的优化进一步提高本工艺方法精度。

2 实验验证

针对一块 $\Phi 230\text{ mm}$ 的回转对称二次非球面展开磁流变抛光验证实验。非球面曲面方程见 (1) 式,其中 $c = 0.002\,488\,8$, K 为二次项系数, $K = -1$ 。工件具体参数如表 2 所示。

表 2 $\Phi 230\text{ mm}$ 非球面镜参数表

Table 2 Parameters of $\Phi 230\text{ mm}$ aspheric mirror

类型	参数
材料	熔石英
口径/mm	$\Phi 230$

实验所用设备为国防科学技术大学自主研发的 KDUP 系列磁流变抛光机,抛光轮直径为 $\Phi 200\text{ mm}$,如图 4 所示。

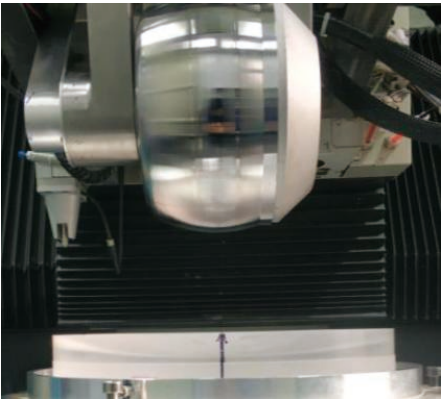


图 4 非球面磁流变对刀验证

Fig. 4 Experimental verification of aspheric magneto-rheological polishing tooling

工件精确调平、找正后,实施对刀验证。以某工件位置对刀校正为例,所取对刀点在机床坐标系下除 Z 坐标和 C 坐标外的坐标值如表 3 所示。

表 3 对刀点坐标值

Table 3 Coordinate values of tooling setting position

点	X/mm	Y/mm	$A/(\text{^\circ})$	$B/(\text{^\circ})$
1	-43.9396	0	0	15.3106
2	43.9396	0	0	-15.3106
3	0	47.4260	15.1779	0
4	0	-47.4260	-15.1779	0

取 X 、 Y 方向对刀点 Z 坐标如表 4 所示。(21) 式中 κ 值计算结果见表 1 所示,按照 (21) 式计算得到

工件在 X 方向相对理想位置的偏置量 a , 判断偏置方向后, 将 a 设置到工件坐标系中, 再次测量 2 个对刀点的 Z 坐标, 见表 4 所示。经过一次调整后, 工件在 X 方向的偏置量降低至 0.004 mm。使用同样的方法校正工件在 Y 方向的偏置, 使工件位姿接近理想状态, 然后建立加工工件坐标系。

表 4 偏置量计算
Table 4 Offset calculation

方向	调整次数	Z_1/mm	Z_2/mm	$\Delta Z/\text{mm}$	a/mm
X	0	-62.637	-62.511	0.126	0.171
	1	-62.571	-62.574	0.003	0.004
Y	0	-62.222	-62.134	0.088	0.117
	1	-62.179	-62.166	0.013	0.018
	2	-62.178	-62.174	0.004	0.005

3 结果讨论

工件坐标系建立完成后, 开始磁流变抛光加工, 所选工件加工前的面形精度为 $\text{RMS} > \lambda/7$, 如图 5(a) 所示。应用磁流变抛光的非球面修形是一个确定性加工过程, 可根据工件面形检测结果进行。因此, 一次修形结束后必须准确测得工件的面形结果, 然后再进行下一次修形, 实验中多次验证了上述对刀方法校正工件位置的有效性。经过 3 次磁流变修形后工件的面形精度达到 $\text{RMS} \leq \lambda/40$, 如图 5(b) 所示。对比加工前与加工后工件面形的误差分布可见, 磁流变抛光加工消除了指定

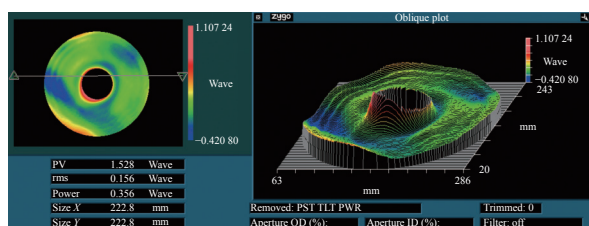
区域的面形误差, 工件面形精度收敛至较高水平。由此可见, 校正后的工件位置达到或接近理想位置, 很好地起到了对正检测数据与磁流变去除函数驻留时间分布的作用。

4 结论

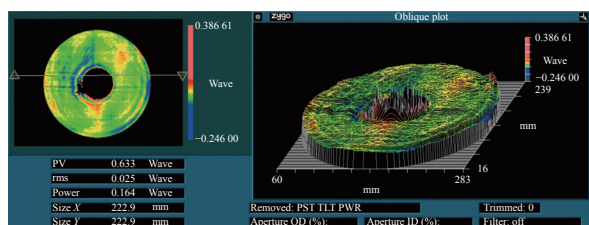
本文以工程应用中回转对称二次抛物面为例, 运用理论分析的方法研究了工件定位偏置的简易消除方法, 在对刀阶段使用抛光轮校正工件位置, 并在 $\Phi 230$ mm 熔石英样件上成功验证了对刀理论。分别在 X 方向和 Y 方向以小于 3 次的调整次数校正工件达到或接近理想位置, 实现了 2 个方向偏置量均低于 0.009 mm, 然后通过磁流变抛光实验进一步验证, 加工后工件面形得到有效收敛。后续将进一步完善该方法, 提高工程应用中非球面磁流变抛光的加工精度及效率。

参考文献:

- [1] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
YANG Li. Advanced optical manufacture technology[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] 郭贵新, 贾宗合, 付秀华, 等. 基于散粒磨料振动抛光非球面加工技术研究[J]. 应用光学, 2017, 38(1): 89-93.
GUO Gulxin, JIA Zonghe, FU Xiuhua, et al. Aspheric machining technology based on vibration polishing of loose abrasive grains[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(1): 89-93.
- [3] 张小兵. 非球面光学元件加工及检测技术综述[J]. 兵器材料科学与工程, 2014(2): 106-111.
ZHANG Xiaobing. Review on manufacture and measurement method of aspheric surface optical part[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014(2): 106-111.
- [4] 李池娟, 孙昌锋, 席喆, 等. 非球面光学元件的应用[J]. 激光与红外, 2013, 43(3): 244-247.
LI Chijuan, SUN Changfeng, XI Zhe, et al. Application of optical aspheric element[J]. Laser and Infrared, 2013, 43(3): 244-247.
- [5] 李晓奇, 刘海鸥. 研磨修带法加工二次非球面[J]. 光电技术应用, 2016, 31(5): 32-35.
LI Xiaoqi, LIU Haiou. Grinding trimming method for processing axisymmetric two aspheric surfaces[J]. Electro-Optic Technology Application, 2016, 31(5): 32-35.



(a) 工件磁流变修形前的面形



(b) 工件磁流变修形后的面形

图 5 工件加工前、后的面形精度

Fig. 5 Surface shape accuracy of workpiece before and after magneto-rheological polishing

- [6] 孟晓辉,王永刚,李文卿,等. $\Phi 420$ mm高次非球面透镜的加工与检测[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 3068-3075.
MENG Xiaohui, WANG Yonggang, LI Wenqing, et al. Fabricating and testing of $\Phi 420$ mm high-order aspheric lens[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 3068-3075.
- [7] 李龙响,郑立功,邓伟杰,等. 应用四轴联动磁流变机床加工曲面[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 2819-2826.
LI Longxiang, ZHENG Ligong, DENG Weijie, et al. Magnetorheological finishing for curve surface based on 4-axis machine[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 2819-2826.
- [8] 袁巨龙,吴喆,吕冰海,等. 非球面超精密抛光技术研究现状[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(23): 167-177.
YUAN Julong, WU Zhe, LYU Binghai, et al. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface[J]. *Mechanical Engineering*, 2012, 48(23): 167-177.
- [9] 张峰. 磁流变抛光技术[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(5): 1-8.
ZHANG Feng. Magnetorheological finishing technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(5): 1-8.
- [10] HARRIS D C. History of magnetorheological finishing[J]. SPIE, 2011, 8016: 1-22.
- [11] JACOBS S D, GOLINI D, HSU Y, et al. Magnetorheological finishing: a deterministic process for optics manufacturing[J]. SPIE, 1995, 2576: 372-382.
- [12] 戴一帆,石峰,彭小强,等. 光学镜面磁流变确定性修形的实现[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 198-205.
DAI Yifan, SHI Feng, PENG Xiaoqiang, et al. Deterministic figuring in optical machining by magnetorheological finishing[J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, 30(1): 198-205.
- [13] 王彦哲,李圣怡,胡皓. 磁流变抛光工件自动定位原理与方法研究[J]. *航空精密制造技术*, 2013, 49(5): 5-8.
WANG Yanzhe, LI Shengyi, HU Hao. Research on principle and approach of workpiece automatic localization technique in magnetorheological finishing[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2013, 49(5): 5-8.
- [14] 周涛,张云飞,樊炜,等. 磁流变抛光回转对称非球面工件精确自定位[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 610-620.
ZHOU Tao, ZHANG Yunfei, FAN Wei, et al. Precise localization of rotary symmetrical aspheric workpiece in magnetorheological finishing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 610-620.
- [15] 郑立功,李龙响,王孝坤,等. 磁流变抛光去除函数的原点位置标定[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 8-14.
ZHENG Ligong, LI Longxiang, WANG Xiaokun, et al. Coordinate-origin calibration of removal function in magnetorheological finishing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 8-14.
- [16] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
PAN Junhua. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004.