

# 新型磁性材料辅助光学抛光技术的研究

邓伟杰 张 峰 李锐钢

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130031)

**摘要** 提出了一种新型的磁介质辅助抛光技术,用于高精度光学表面的数控抛光。在强磁场的作用下,磁介质吸附在磁轮上并沿着磁力线方向排列起来,形成环状凸起“磁性抛光刷”。磁轮高速旋转时,循环注入抛光液,对工件表面实现材料去除。完成了磁介质辅助抛光工具设计、制造,以及与数控机床的组装调试。采用 K9 玻璃工件进行了工艺实验,获得了去除函数分布及表面粗糙度。

**关键词** 光学制造;磁介质辅助抛光;去除函数

**中图分类号** TH762 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s116004

## Magnetic Medium Assistant Polishing Technology

Deng Weijie Zhang Feng Li Ruigang

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130031, China)

**Abstract** In this paper, a novel magnetic medium assistant polishing technology and device is researched to complete the finish step of the optics. As the device working, the magnetic powder arranged with the magnetic field distribution. The magnetic powder became a flexible brush. The magnet wheel working with a high rolling velocity and the polishing liquid with abrasive is injected to contact region. The magnetic powder flexible brush is reforming with the magnetic field all the time, so the removal tool of the fabrication is invariable. The design and manufacture is finished and the device was connected to the CNC machine and experiment is completed to get the removal function, and roughness with K9 glass. The technology could be used in the practical fabrication.

**Key words** optical fabrication; magnetic-medium assistant polishing; removal function

**OCIS codes** 220.4610; 160.0160; 220.5450

## 1 引 言

光学系统的发展对光学制造技术提出了高精度、高效率、高表面质量等要求,各种新型的光学加工方法不断涌现。利用磁性材料在磁场中的特殊性,各种磁效应辅助抛光技术成为研究的热点<sup>[1]</sup>。20 世纪 80 年代初,日本人提出了磁场效应辅助光学零件加工方法,将磁场用于光学加工中。Y Tain 和 K. Kawata<sup>[2]</sup>利用磁场辅助抛光对聚丙烯平片进行加工,经过抛光,表面粗糙度得到显著改善。到 20 世纪 90 年代初,W. I. Kordonski 与 Jacobs 等合作,提出了磁流变抛光技术(MRF),并应用于光学元件面形误差的确定性抛光<sup>[3]</sup>。该技术具有加工精

度高、光学表面质量好等特点,解决了常规非球面加工技术难以解决的中高频误差较大、表面粗糙度不好等技术难题。由于 MRF 技术成本较高,设备复杂,因此虽然美国 QED 公司推出了商业产品,但是 MRF 技术仍然只是在部分高端光学元件制造中使用,而且,MRF 技术作为一项可用于军用光学的高端技术,美国严格对华禁止输出。

磁流变抛光技术给光学制造工作者提供了一种新的思路来完成高精度光学元件的数控抛光。本文提出了一种新型的具有自主知识产权的磁介质辅助抛光技术(MMAP),通过磁场分布设计,制作出中心带具有强磁场的磁性轮。利用磁性轮产生的磁场

**收稿日期**: 2011-07-20; **收到修改稿日期**: 2011-09-08

**基金项目**: 国家自然科学基金重点项目(61036015)资助课题。

**作者简介**: 邓伟杰(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事光学非球面加工与检测等方面的研究。

E-mail: mr-deng@163.com

分布,使磁性抛光粉产生环状凸起,形成磁性抛光刷。加工时,磁性轮高速旋转,磁性抛光粉结合可循环更新的抛光液,对光学元件表面实现去除。磁性抛光粉刷此时起到的相当于传统光学加工中磨盘沥青的作用,容纳抛光磨料颗粒。有着显著区别的是,磁介质抛光粉凸起带经过设计的磁场后,在抛光过程中能够保持形状稳定,不会出现传统加工过程中的磨头磨损问题,实现了去除特性稳定的确定性加工。

## 2 基本原理

磁性抛光轮是磁介质辅助抛光工具中的核心组件,如图 1 所示。加工时,在强磁场作用下,填充在磁场中的磁介质被沿着磁力线的方向排列起来,吸附在磁极上形成“磁性抛光刷”,并对工件表面产生一定的压力,磁极在带动“抛光刷”旋转的同时,保持恒定的间隙沿工件表面移动,同时抛光刷与工件表面接触的区域注入循环更新的抛光液,从而实现对工件表面的面形误差修正。通过磁场的特殊设计,使“磁性抛光刷”在抛光后旋转一周恢复原始形态,保证每次与工件表面接触时磁性抛光刷形状一致,结合循环过滤的抛光液,实现去除函数的稳定。

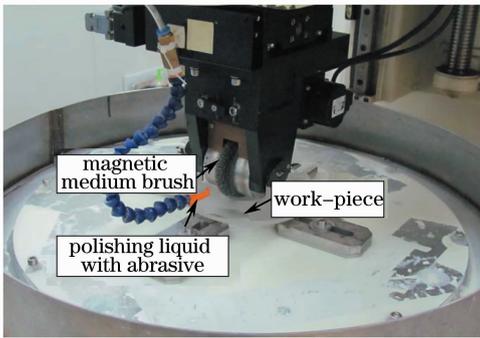


图 1 磁介质辅助抛光装置

Fig. 1 Magnetic medium assistant polishing device

在这个过程中,抛光液注入磁介质沿磁力线形成的抛光刷内部后,成为磁性抛光刷的一部分。抛光液主要成分包括稳定剂、分散剂和抛光粉颗粒,为防止铁基的磁介质抛光粉在加工过程中被氧化,抛光液中添加了酸碱调节剂使其 PH 值达到 9~10 之间。磁介质粉颗粒微观形态类似椭球形,表面锐角较少,因此认为磁介质粉颗粒在抛光时主要沿工件表面滑动,对材料去除很小。对工件表面实现材料去除的主要是抛光粉颗粒,磨粒刀尖在抛光压力作用下对工件表面产生微切削作用,同时磨粒还对工件表面起到一定的挤压作用。

## 3 材料去除模型

当磁介质附着于磁性轮表面时,各磁链将沿磁力线方向排列。由电磁理论可知,两种不同导磁材料(相对导磁率不同)相互接触时,磁感应强度方向垂直于这个接触面,并且在界面上的磁压力<sup>[4,5]</sup>为

$$P = \left( \frac{B^2}{2\mu_0} \right) \left( \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2} \right), \quad (1)$$

式中  $B$  为通过接触界面的磁感应强度; $\mu_1$ 、 $\mu_2$  为不同材料的相对磁导率。

由于被加工的光学材料(玻璃、SiC、Si)等为非导磁材料,可认为其相对磁导率等于 1。假设磁性抛光刷的相对磁导率为  $\mu_m$ ,则(1)式变为

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} \left( 1 - \frac{1}{\mu_m} \right), \quad (2)$$

将磁介质、抛光液看成一个整体,认为磁刷是由具有导磁性能的铁基软磁材料、水以及磨料颗粒等组成,根据电磁相似性原理,利用电导率计算的 Eucken 原理,可推得

$$\mu_m = \frac{1 - 2[V_m(\mu_s - \mu_m)/(2\mu_s + \mu_m) + V_f(\mu_s - \mu_f)/(2\mu_s + \mu_f)]}{1 + [V_m(\mu_s - \mu_m)/(2\mu_s + \mu_m) + V_f(\mu_s - \mu_f)/(2\mu_s + \mu_f)]}, \quad (3)$$

式中  $V_m$  为等效抛光刷中有效磨料颗粒的体积, $V_f$  为等效抛光刷中磁介质的体积; $\mu_s$ 、 $\mu_m$ 、 $\mu_f$  分别为水、磨料以及磁介质的磁导率(单位为 H/m)。水、磨料的磁化率相对磁介质可近似认为等于 0,因此  $\mu_s = \mu_m = \mu_0$ ;设磁介质的相对磁导率  $\mu_r = \frac{\mu_f}{\mu_0}$ ,代入(3)

式得

$$\mu_m = \frac{(2 + \mu_r) - 2(1 - \mu_r)V_f}{(2 + \mu_r) + (1 - \mu_r)V_f}. \quad (4)$$

令等效磁刷中磁介质所占的体积百分比为  $W$ ,则

$$V_f = \frac{\pi W}{6}, \text{ 代入(4)式得}$$

$$\mu_m = \frac{6(2 + \mu_r) - 2\pi(1 - \mu_r)W}{6(2 + \mu_r) + \pi(1 - \mu_r)W}. \quad (5)$$

综合(1)~(5)式,实际加工时磁介质抛光头对工件表面的压强为  $P$ (单位为  $N/mm^2$ ),即

$$P = \frac{B^2}{4\mu_0} \times \frac{3\pi(\mu_r - 1)W}{3(2 + \mu_r) + \pi(\mu_r - 1)W}. \quad (6)$$

与机械加工相比,光学加工过程更加的复杂。在抛光过程中,不仅存在抛光工具与工件表面的机械切削作用,也有抛光模、抛光液、水和工件之间的化学作用,还存在被抛光材料表面分子的流动现象。因此,Preston 在符合实际的前提下,对抛光过程做

了一定的假设,即:在很大的数值范围内,抛光可以描述成一个线性方程:

$$\Delta Z(x,y) = kP(x,y)V(x,y), \quad (7)$$

式中  $\Delta Z(x,y)$  为抛光工具驻留某点  $D(x,y)$  单位时间内的材料去除量; $P(x,y)$  为抛光工具与工件间的相对压强; $V(x,y)$  为抛光工具与工件间的相对运动速度; $k$  为与加工过程有关的比例常数(其他影响因素)。

在这个假设中,Preston 将速度和压力以外的其他所有因素的作用全部归为一个比例常数  $K$ ,这样就建立起了一个材料去除量、压力和瞬时速度之间的线性关系。此外,用线性系统的理论来建立新的数学模型表示去除过程,可以大大简化实际运算过程。

1) 假设表面材料的去除只是由于在表面运动的磨头作用所致,所以不需要知道材料去除的机理,而只需要知道抛光模在工件某一区域驻留单位时间内产生的材料去除量;

2) 假设抛光时材料去除量只与磨头自身的运动方式有关,而与磨头在工件表面上的移动无关,即要求实际运动着的磨头转动速度比磨头在工件表面上移动的速度要大得多;

3) 假设磨头在整个工件表面上的抛光速率不变,即磨头要求是完全柔性的,以保证磨头在工件表面上每一点都施加相同的压力;

4) 假设加工过程中其他工艺参数保持不变。

通过合理假设,简化了光学抛光过程,对于控制工程来说,这是非常有利的。磁介质辅助抛光技术的柔性抛光刷的特性,符合上述四个 Preston 假设的条件,因此,磁介质辅助抛光技术的材料去除率为

$$MR = K \cdot \frac{B^2}{4\mu_0} \times \frac{3\pi(\mu_r - 1)WV}{3(2 + \mu_r) + \pi(\mu_r - 1)W}, \quad (8)$$

对(8)式中的速度量进行积分运算即可求得磁介质辅助抛光去除函数的理论分布。

## 4 实验结果

如图 1 所示,将磁效应抛光工具集成到 FSGJ-2B 非球面数控加工中心抛光工具平台上,进行了一系列的去除函数实验。加工工件为 K9 玻璃,去除实验的参数为,抛光工具尺寸为  $\varphi 60$  mm,磁介质为 PF 40/0 铁基软磁材料粉末,抛光液中有有效抛光颗粒为粒度  $1 \mu\text{m}$   $\text{CeO}_2$ ,浓度为 2.5%。

由图 2 可见,磁流变抛光得到的去除函数为一不规则分布,其中一个方向对称,另一个方向不对称。其去除函数形状明显区别于传统的计算机控制小磨

头抛光的去除函数分布。理论上来说,最有利于面型误差校正的去除函数分布为脉冲函数,但在实际加工中这是不存在的。磁介质辅助抛光是其可实现的替代函数,便于顺利进行数控抛光,具有以下性质:1) 去除函数只有一个最大去除量尖峰,并且远离该尖峰而单调减少;2) 去除函数单调减少到零值以后,其他地方值为零;3) 去除函数是连续光滑的函数<sup>[6]</sup>。因此,磁介质辅助抛光的去除函数,是可以在光学数控抛光中使面形误差快速收敛,加工出高面形精度、高表面质量的光学零件。图 3 是磁介质辅助抛光后表面粗糙度  $R_a$  的检测结果,优于 1.5 nm。

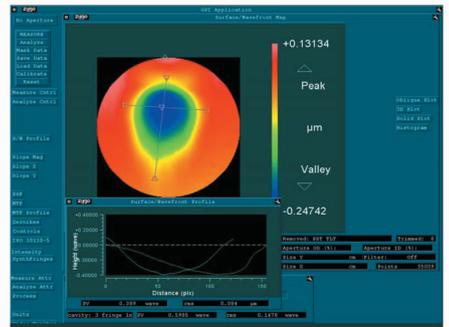


图 2 磁介质辅助抛光的去除函数

Fig. 2 Removal function of the MMAP

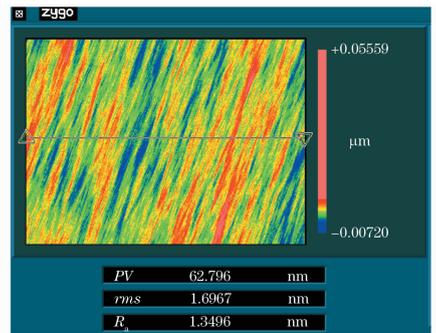


图 3 磁介质辅助抛光后表面的粗糙度

Fig. 3 Roughness of the surface by MMAP

## 5 结 论

提出了一种新型的磁介质辅助抛光技术,用于高精度光学表面的数控抛光。在强磁场的作用下,磁介质沿着磁轮磁力线的方向排列起来,吸附在磁轮上形成环状凸起“磁性抛光刷”。磁轮高速旋转时,循环注入抛光液,对工件表面实现材料去除。通过磁场的特殊设计,使磁粉刷抛光旋转后恢复原始形态,保证每次与工件表面接触时磁性抛光刷形状一致,结合循环过滤的抛光液,实现去除函数的稳定。对抛光的去除函数模型进行了研究。在抛光过程中,认为抛光液是磁性抛光刷的一部分,其受到的工件的作用力与磁

介质一致。在此基础上获得了去除函数的理论模型。最后,采用 K9 玻璃工件进行了工艺实验,获得了磁介质辅助抛光技术的去除函数分布。加工后的表面粗糙度达到 1.5 nm。磁介质辅助抛光技术可以在光学数控抛光中使面形误差快速收敛,加工出高面形精度、高表面质量的光学零件。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Li. Advanced optical machining technique[M]. Beijing: Science Press, 2001. 120~238  
杨 力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 120~238
- 2 Y. Tain, K. Kawata. Development of high-efficiency fine finishing process using magnetic fluid[J]. *Annals of the CIRP*.

- 1984, **33**(1): 217~220
- 3 Zhang Feng, Zhang Binzhi. Surface roughness of optical elements fabricated by magnetic fluid-assisted polishing[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2005, **13**(1): 34~38  
张 峰, 张斌智. 磁流体辅助抛光工件表面粗糙度研究[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(1): 34~38
- 4 Shaohui Yin, Takeo Shimura. Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy [J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*, 2004, **44**(12-13): 1297~1303
- 5 V. K. Jain. Magnetic field assisted abrasive based micro-/nanofinishing [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2009, **209**(20): 6022~6038
- 6 Jessica E. DeGroote, Anne E. Marino *et al.*. Removal rate model for magnetorheological finishing of glass[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(32): 7927~7941

栏目编辑: 胡 冰