

文章编号 1004-924X(2007)10-1583-06

超声波磁流变复合抛光中几种 工艺参数对材料去除率的影响

王慧军, 张飞虎, 赵航, 栾殿荣, 陈亚春
(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:提出了一种光学抛光的新方法——超声波磁流变复合抛光。介绍了该抛光方法的基本原理和实验装置,进行了超声波磁流变复合抛光实验,采用轮廓仪实测了光学玻璃超声波磁流变抛光材料去除轮廓曲线。通过该项工艺实验,研究了五种工艺参数(磁场强度、超声振幅、抛光工具头与工件的间隙、抛光工具头转速、工件转速)对光学玻璃材料去除率的影响。在一定实验条件下,获得的材料去除率为 $0.139 \mu\text{m}/\text{min}$,并获得了超声波磁流变复合抛光工艺参数与材料去除率的关系曲线,得出了光学玻璃超声波磁流变复合抛光的材料去除规律。

关键词:材料去除率;超声波磁流变复合抛光;超声波抛光;磁流变抛光;超精密加工

中图分类号:TQ171.684;TH161 **文献标识码:**A

Effect of several processing parameters on material removal ratio in ultrasonic-magnetorheological compound finishing

WANG Hui-jun, ZHANG Fei-hu, ZHAO Hang, LUAN Dian-rong, CHEN Ya-chun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A new optical polishing method for aspheric surface, Ultrasonic-Magnetorheological Compound finishing (UMC finishing), is presented. The machining principle and the experimental procedure of UMC finishing are introduced. Then the material removal profile for optical glass in UMC finishing is measured by a profile meter (Form Talysurf PGI 1240), and the material removal ratio in UMC finishing is calculated. The effect of several processing parameters (magnetic flux density, ultrasonic vibration amplitude, minimum gap between polishing head and workpiece, rotational speed of polishing head and rotational speed of workpiece) on the material removal ratio for optical glass in UMC finishing is researched. The results show that the material removal ratio in UMC finishing is $0.139 \mu\text{m}/\text{min}$ under some experimental conditions. The rules of material removal ratio for optical glass in UMC finishing are obtained, which provides a foundation for further research of UMC finishing technology.

Key words: material removal ratio; ultrasonic-magnetorheological compound finishing; ultrasonic polishing; magnetorheological finishing; ultraprecision machining

收稿日期:2007-06-24;修订日期:2007-08-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50575059);高等学校博士点专项基金资助项目(No. 20050213040)

1 引言

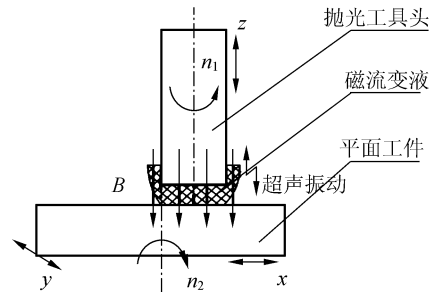
随着现代光学技术的迅速发展,人们对光学系统提出了许多新要求,例如高分辨率、大视场等,这些要求促使光学设计者越来越多地考虑采用非球面镜。非球面光学元器件也广泛应用于航空机载设备、卫星、激光制导、红外探测、激光核聚变、巡航导弹、眼科仪器、各种民用照相机及摄影机、望远镜、显微镜等诸多军工和民用领域。非球面的应用离不开非球面的加工和检测技术,由于受抛光工具尺寸等诸多因素的影响,非球面光学元器件的超精密加工问题一直困扰着光学制造业^[1-3]。本文介绍了超声波磁流变复合抛光这一新的光学加工方法,该方法为非球面的超精密加工,尤其是具有小曲率半径的凹曲面的超精密加工开拓了一种新思路。超声波磁流变复合抛光方法将超声波抛光^[4-5]与磁流变抛光^[6-8]有机地复合在一起,因此兼有两种方法的优点。在超声波磁流变复合抛光中,由于材料是在小范围内被去除,因此,该方法可应用于小曲率半径的凹曲面的抛光加工。我们以前实验研究已经证明超声波磁流变复合抛光方法具有比常规磁流变抛光方法更高的抛光效率^[9],并且讨论过超声波磁流变复合抛光实验装置及超声波磁流变复合抛光光学玻璃K9的材料去除率理论、去除模型^[10]和超声波磁流变复合抛光中磁场的选择^[11]。

本文从实验出发,通过讨论超声波磁流变复合抛光光学玻璃材料的各工艺参数与材料去除率的关系,进一步研究超声波磁流变复合抛光技术。

2 超声波磁流变复合抛光原理

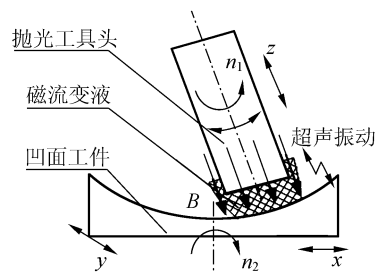
图 1 所示为超声波磁流变复合抛光加工原理图。在超声波磁流变复合抛光中,采用具有小直径的抛光工具头,利用抛光工具头的端面进行抛光。在抛光过程中,当正确装夹工件后,在旋转的抛光工具头上通入磁流变液,并施加具有一定磁感应强度的磁场,使磁流变液在抛光工具头端面形成具有一定去除能力的柔性抛光工具。与此同

时,在抛光工具上施加超声振动,超声振动能量直接作用于抛光加工区域,提高抛光的效率。该方法可采用小直径的抛光工具头,克服了普通磁流变抛光需使用较大直径抛光轮的缺点,不仅能够实现具有较小曲率半径的凹曲面的纳米级表面抛光,还可推广应用到自由曲面的抛光加工中。



(a) 超声波磁流变复合抛光平面/凸面原理图

(a) Mechanic scheme of UMC finishing flat/convex surface



(b) 超声波磁流变复合抛光凹曲面原理图

(b) Mechanic scheme of UMC finishing concave surface

图 1 超声波磁流变复合抛光加工原理图

Fig. 1 Scheme of mechanics of UMC finishing

图 1(a)为超声波磁流变复合抛光平面/凸曲面的原理图,抛光工具头超声振动的同时,以 n_1 的转速沿自身轴线旋转,抛光工具头与工件之间有一大小可控的间隙,用于施加含有一定浓度抛光磨粒的磁流变液。工件以 n_2 的转速自身旋转,其旋转方向与抛光工具头相反。在超声波磁流变抛光过程中,在抛光区域产生剪应力,因此实现了

材料的去除,同时超声振动能提高抛光去除效率。图 1(b)为超声波磁流变复合抛光凹曲面的原理图,与抛光平面相比,抛光凹面时,抛光工具头多了一个摆动运动,在加工过程中,使抛光工具头与工件成某一角度,从而实现凹面的抛光。

3 超声波磁流变复合抛光工艺实验

图 2 为超声波磁流变复合抛光的抛光区域示意图。具有球形端面的抛光工具头在垂直方向超声振动的同时,施加磁感应强度为 B 的磁场。图中, n_1 为抛光工具头的转速, h_0 为抛光工具头与工件之间的最小距离, R 为抛光工具头球端半径, x 为抛光点到抛光区域中心的距离。在超声波磁流变复合抛光过程中,磁流变液通过喷嘴由泵压入抛光区域,流出抛光区域后进入液槽,又经泵压出液槽,反复循环,因此,抛光过程中产生的热和碎屑能随磁流变液的循环而不断地去除,保证了抛光过程的稳定性。

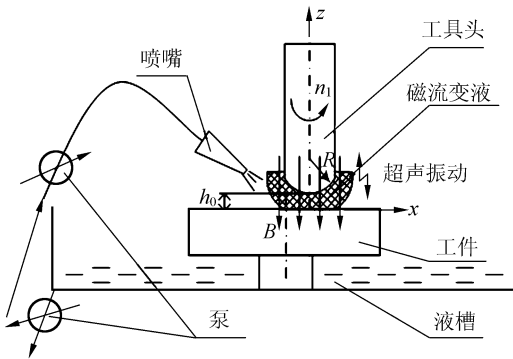


图 2 超声波磁流变复合抛光区域示意图
Fig. 2 Scheme of UMC finishing zone

影响超声波磁流变复合抛光效果的因素较多,本文只对几个主要参数加以分析,力图找到在当前工作条件下可以实现超声波磁流变复合抛光最佳效果的工作参数。以光学玻璃 K9 平面工件的超声波磁流变复合抛光为例,通过实验来研究磁场强度、超声振幅、抛光工具头与工件间隙、转速等工艺参数对材料去除率的影响规律。

4 实验结果与讨论

实验条件为:磁感应强度 1 500 Gs,抛光工具头转速 280 r/min,工件与抛光工具头之间的最小间隙 0.3 mm,超声频率 20 kHz,超声振幅 5 μm 。

图 3 所示为实测超声波磁流变复合抛光平面光学玻璃工件 20 min 后,采用泰勒轮廓仪(Form Talysurf PGI 1 240)测量的超声波磁流变复合抛光区材料去除轮廓曲线(沿抛光区直径方向扫描结果),纵坐标为材料去除量。材料去除轮廓曲线形状类似字母 W,最大材料去除深度为 2. 779 0 μm ,材料去除率为 0. 139 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。

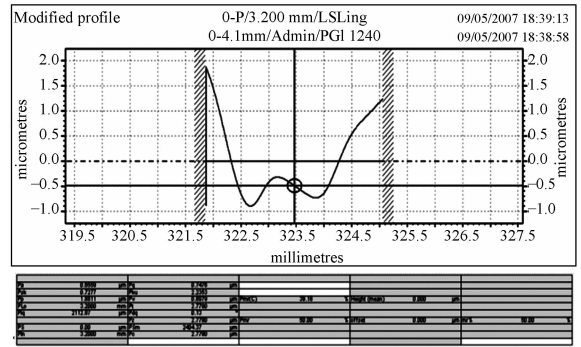


图 3 实测超声波磁流变复合抛光材料去除轮廓曲线
Fig. 3 Measured material profile curve of UMC finishing

分别对磁场强度、超声振幅、抛光工具头与工作间隙、转速等进行了实验。实验中 K9 光学玻璃($\phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$)为工件材料,在相同时间内进行抛光实验。

(1) 磁场强度对材料去除率的影响。在其它

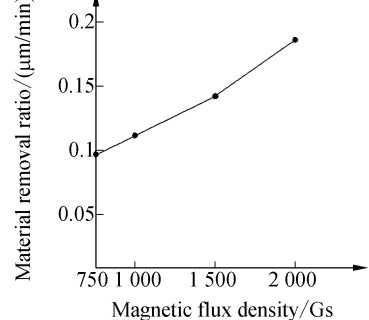


图 4 磁感应强度对材料去除率的影响
Fig. 4 Effect of magnetic flux density on material removal ratio

工艺参数保持不变的情况下,通过在不同磁感应强度下实验,得到图 4 所示的磁感应强度与材料去除率的关系曲线。

从图 4 可见,随着磁感应强度的增加,材料去除率逐渐增大。这是由于在超声波磁流变复合抛光光学玻璃过程中,抛光区域的磁流变液在梯度磁场的作用下,粘度升高成为具有粘塑性质的 Bingham 介质,这种介质在磁场较高的地方形成未发生剪切屈服的“硬核心”,在超声振动的共同作用下,对工件表面与之接触的区域产生很大的剪切力,从而实现工件材料的去除。

由经典普林斯顿方程可知,超声波磁流变复合抛光材料去除率 R 可表示如下:

$$R = Kpv, \quad (1)$$

其中, K —普利斯頓系数,与抛光实验条件有关, p —抛光压力, v —抛光速度。

由于重力引起的压力与其它原因引起的压力相比可以忽略不计,因此超声波磁流变复合抛光压力 p 可表示为:

$$p = p_u + p_m + p_d, \quad (2)$$

其中, p_u —超声振动压力, p_m —磁场压力, p_d —流体动压力。

因此磁感应强度越强,磁场压力 p_m 越大,由式(2)可知,抛光总压力 p 也越大,因此材料去除率也就越高。

(2) 超声振幅对材料去除率的影响。在保持其它工艺参数保持不变的情况下,通过在不同超声振幅下的实验,得到图 5 所示的超声振幅与材料去除率的关系曲线。

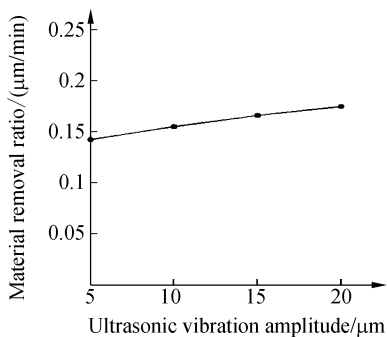


图 5 超声振幅对材料去除率的影响

Fig. 5 Effect of ultrasonic vibration amplitude on material removal ratio

从图 5 可以看出,随着超声振幅的增加,材料

去除率逐渐增大。随着超声振幅的增加,超声压力 p_u 增大,由式(2)可知,超声波磁流变复合抛光总压力 p 也增大,对材料的去除作用增大,因此提高了去除效率。但由于超声波磁流变复合抛光中,超声振动压力是总压力的一部分,因此超声振幅对去除率的影响并非线性影响。

(3) 抛光工具头与工件的间隙对材料去除率的影响。在保持其它工艺参数保持不变的情况下,通过在抛光过程中改变工件与抛光工具头之间的最小间隙,得到图 6 所示的工件与抛光工具头之间的最小间隙与材料去除率的关系曲线。

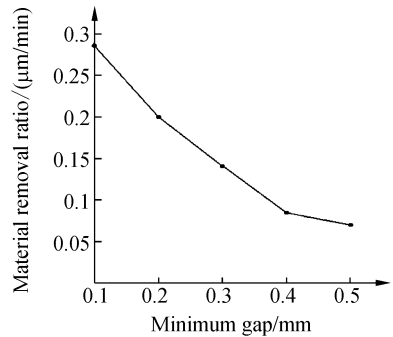


图 6 工件与抛光工具头之间的最小间隙对材料去除率的影响

Fig. 6 Effect of minimum gap between the polishing head and the workpiece on material removal ratio

从图 6 可以看出,随着工件与抛光工具头之间间隙的减小,材料去除率逐渐增大。当抛光工具头与工件之间的间隙减小时,一方面超声振幅、频率保持不变,超声作用将增强,作用在抛光区域的超声压力 p_u 增大;另一方面,磁场的梯度分布不变,磁场压力 p_m 增大,造成磁流变液对抛光颗粒的把持作用增大。由式(2)可知,超声波磁流变复合抛光总压力 p 增大,因此磁流变液对光学玻璃表面的机械刮除作用增大,这也是随着抛光间隙的减小抛光材料去除率明显增大的主要原因。

(4) 抛光工具头转速对材料去除率的影响。在保持其它工艺参数保持不变的情况下,改变抛光工具头的转速分别为: 140、280、420、560 r/min,对光学玻璃进行抛光试验得到材料去除率变化曲线如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,随着抛光工具头转速的增加,超声波磁流变复合抛光材料去除率逐渐增

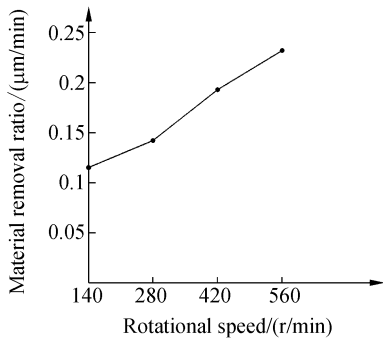


图 7 抛光工具头转速对材料去除率的影响

Fig. 7 Effect of rotational speed of polishing head on material removal ratio

大。当抛光工具头转速增大时,在抛光工具头的带动下,在超声波磁流变复合抛光区的流体动压力 p_d 增大,由式(2)可知,超声波磁流变复合抛光总压力 p 增大;由式(1)可知,速度的增大对工件

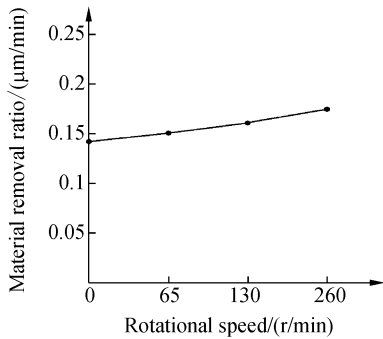


图 8 工件转速对材料去除率的影响

Fig. 8 Effect of rotational speed of workpiece on material removal ratio

表面产生了更大的去除作用,使光学玻璃工件的抛光去除率增大。

(5)工件转速对材料去除率的影响。在保持其它工艺参数保持不变的情况下,改变工件的转速分别为:65、130、260 r/min,对光学玻璃进行抛光试验得到材料去除率曲线如图 8 所示。

为了直观地分析工件转速对材料去除率的影响,在实验中始终将工件中心置于抛光区中心位置,改变工件自转速度来测量去除率的变化。从工件转速对材料去除率影响曲线中可以看出,去除率随着工件转速的增大而增大,其影响原因与抛光工具头转速影响材料抛光去除率相类似。

5 结 论

本文提出的超声波磁流变复合抛光方法是针对非球面,尤其是针对具有小曲率半径的凹非球曲面和自由曲面光学元器件进行的超精密抛光加工的新方法。通过实验,研究了超声波磁流变复合抛光中主要工艺参数(磁场强度、超声振幅、抛光工具头与工件的间隙、抛光工具头转速、工件转速)对光学玻璃 K9 材料去除率的影响。实验结果证明:在一定实验条件下,获得了光学玻璃材料抛光去除率为 $0.139 \mu\text{m}/\text{min}$ 。给出了超声波磁流变复合抛光中各工艺参数与材料去除率的关系曲线,并得到了光学玻璃 K9 材料的去除规律,为进一步研究超声波磁流变复合抛光技术奠定了基础。

参考文献:

- [1] 薛栋林,张忠玉,张学军.一种中小口径非球面元件数控抛光技术[J].光学精密工程,2005,13(2):198-204.
XUE D L, ZHANG ZH Y, ZHANG X J. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 198-204. (in Chinese)
- [2] 牛海燕,张学军. $\varphi 124$ mm 口径碳化硅质非球面镜面数控研抛技术研究[J].光学精密工程,2006,14(4):539-544.
NIU H Y, ZHANG X J. Research on computer controlled polishing technology of $\varphi 124$ mm aspheric reaction-burned silicon carbide mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 539-544. (in Chinese)
- [3] 张剑寒,张宇民,韩杰才,等.空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试[J].光学精密工程,2006,14(2):179-184.
ZHANG J H, ZHANG Y M, HAN J C, et al.. Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 179-184. (in Chinese)
- [4] 曹凤国.超声加工技术[M].北京:化学工业出版社,2000.
CAO F G. *Ultrasonic Machining Technology*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. (in Chinese)

- [5] 周忆, 米林, 廖强, 等. 基于超声研磨的超精密加工[J]. 航空精密制造技术, 2003, 39(1): 1-4.
ZHOU Y, MI L, LIAO Q, *et al.*. Ultraprecision machining technique based on ultrasonics polishing[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2003, 39(1): 1-4. (in Chinese)
- [6] GOLINI D, JACOBS S D, KORDONSKY W I. Fabrication of glass aspheres using deterministic microgrinding and magnetorheological finishing[J]. *SPIE*, 1995, 2536: 208-211.
- [7] KORDONSKI W I, GOLINI D, DUMAS P, *et al.*. Magnetorheological suspension-based finishing technology[J]. *SPIE*, 1998, 3326: 527-535.
- [8] KORDONSKY W I, GOLINI D. Fundamentals of magnetorheological fluid utilization in high precision finishing [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2000, 10: 683-689.
- [9] ZHANG F H, WANG H J, LUAN D R. Research on machining mechanics and experiment of ultrasonic-magnetorheological compound finishing[C]. *Proceedings of the International Conference on Surface Finishing Technology and Surface Engineering (ICSFT2006)*, Sydney, Australia, 2006: 25-30.
- [10] WANG H J, ZHANG F H, ZHANG Y, *et al.*. Research on material removal of ultrasonic-magnetorheological compound finishing[J]. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2007, 2(1): 50-58.
- [11] ZHANG F H, WANG H J, LUAN D R, *et al.*. Research on magnetic field in ultrasonic-magnetorheological compound finishing [C]. *Proceeding of the 9th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2006)*, Sydney, Australia, 2006: 140-145.

作者简介:王慧军(1975—),女,辽宁沈阳人,哈尔滨工业大学在读博士研究生,主要从事超声波磁流变复合抛光技术研究;E-mail: hj_wang2003@yahoo.com.cn

张飞虎(1964—),男,河南郑州人,哈尔滨工业大学教授,博士生导师,主要从事精密及超精密加工技术研究。
E-mail: zhangfh@hit.edu.cn