

文章编号: 1001- 2486(2009) 04- 0025- 06

纳米金刚石磨料磁流变抛光材料去除机理与工艺研究*

石 峰, 戴一帆, 彭小强, 康念辉, 刘志军

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 理论分析与实验验证表明, 纳米金刚石磨料磁流变抛光材料去除机理是塑性剪切去除。在 KDMRF- 1000F 磁流变抛光机床上进行工艺实验, 研究抛光轮与工件表面的间隙、抛光轮转速、磁场强度对峰值去除效率和表面粗糙度的影响。工艺实验表明, 去除函数具有良好的稳定性和重复性, 2.5h 以内峰值去除效率稳定在 $\pm 0.3\%$ 以内, 体积去除效率稳定在 $\pm 0.5\%$ 以内。直径 202mm (有效口径 95%) 的 HIP SiC 平面镜采用子孔径拼接测量方法, 经过磁流变粗抛 (30h) 和精抛 (9h) 后, 面形误差 PV 值 0.13 μm , RMS 值 0.012 μm , 表面粗糙度 RMS 值 2.439nm。

关键词: 磁流变抛光; 去除机理; 纳米金刚石; 工艺

中图分类号: TH161 文献标识码: A

Study on the Mechanism and Arts of Magnetorheological Finishing (MRF) by Nano-sized Diamond Abrasives

SHI Feng, DAI Yi-fan, PENG Xiao-qiang, KANG Nian-hui, LIU Zhi-jun

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Material removal mechanism in MRF process by nano-sized diamond abrasives is proved to be a plastic shear removal. Process experiments showed the relationship between polishing parameters (rotation speed, gap between polishing wheel and work piece, and intensity of magnetic field) and peak removal rate or surface roughness. Polishing spot is proved to be stable and repeatable. Within 2.5h, the change of peak removal rate is below $\pm 0.3\%$ and the change of volume removal rate is below $\pm 0.5\%$. One HIP SiC flat (202mm in diameter) is polished with KDMRF-1000F polishing machine and KDMRW-3 water-based MR fluids. After rough polish (30h) and finishing polish (9h), its surface form accuracy peak-to-valley (PV) is 0.13 μm , root-mean-square (RMS) is 0.012 μm and roughness RMS is 2.439nm.

Key words: MRF; removal mechanism; nano-sized diamond; process and arts

确定性磁流变抛光技术是美国 Rochester 大学在上世纪 90 年代中期将电磁学、流体动力学、分析化学理论相结合而提出的一种新型光学零件加工技术^[1]。磁流变抛光技术是利用磁流变抛光液在磁场中的流变性对工件进行抛光。磁流变液循环进入到抛光区域内, 在高强度的梯度磁场的作用下, 成为具有粘塑性的 Bingham 介质, 粘度变大, 形成具有一定能适应工件面形形状的“柔性抛光模”, 从而对工件材料进行剪切去除。确定性磁流变抛光提供了一种可以准确控制去除量的确定性抛光方法, 它具有材料去除确定性强的优点。在磁流变抛光过程中, “柔性抛光模”内部的磁流变液与抛光磨粒不断地进行循环更新。(1) 能够加工得到高面形精度。通过计算机控制, 磁流变抛光实现了真正的确定性光学零件加工, 实现对光学零件误差的定量去除, 从而得到高精度光学零件面形。(2) 能够获得高质量的光学表面。不同于传统光学零件抛光材料是由于压应力破碎去除, 磁流变抛光中材料是由于剪切应力进行去除, 实现微米级甚至纳米级的材料去除加工, 因此能够获得较好的光学零件表面粗糙度。同时由于抛光是由“柔性抛光模”进行的, 工件表面层和次表面层不会产生内部应力, 因而不会造成损伤, 易得到较高的光学表面质量。(3) 易于实现计算机控制, 从而得到高加工效率。(4) 对定位、温度控制和工件装夹等条件

* 收稿日期: 2009- 05- 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50775215, 50875256); 国家部委基金资助项目 (9140A18070108KG0147)

作者简介: 石峰 (1980-), 男, 博士生。

要求不高,且振动、磨损以及抛光模边缘效应误差在传统小磨头抛光技术中是比较难以解决的问题,在磁流变抛光技术中不会对工件加工产生影响。

纳米金刚石磨料磁流变液具有去除效率高、加工表面质量好等特点,具有良好的加工适应性。纳米金刚石磨料进行表面改性后,可以实现在水介质中的分散和稳定,形成稳定的水基纳米金刚石磨料磁流变液,可广泛适用于碳化硅等硬质光学材料的超光滑抛光。抛光过程的材料去除机理与工艺参数决定了材料去除效率和表面质量,因此,研究纳米金刚石磨料磁流变抛光材料去除机理与基本抛光工艺十分必要。

1 磁流变抛光材料去除机理

自研的KDMRW-3纳米金刚石磨料水基磁流变抛光液主要由微米直径的羰基铁粉(CI)、纳米粒径的金刚石磨料和基载液组成,其中羰基铁粉的扫描电镜如图1(a)所示。由图1(a)可见,羰基铁粉表面光滑,分布均匀,粒径主要分布在3~5 μm 。由于纳米金刚石磨料的粒径很小,极易造成分散不均,导致局部抱团,影响加工工件表面质量,因此采取将金刚石磨料与基载液均匀混合后再与羰基铁粉混合的方法。混和后的磁流变抛光液扫描电镜如图1(b)所示。由图1(b)可见,经过高剪切速率机械分散和超声分散后,金刚石磨料与羰基铁粉颗粒混合均匀,无结块、团聚等现象。如图2所示,在高梯度磁场作用下,磁流变抛光液会形成微结构为链状的缎带凸起,根据铁磁流体力学理论,高强度磁场对非磁性抛光粉颗粒有浮力作用,因此在具有高强度磁场的抛光区中,非磁性抛光粉颗粒从磁流变抛光液中析出并浮于表面,形成“柔性抛光盘”,实现材料的去除。

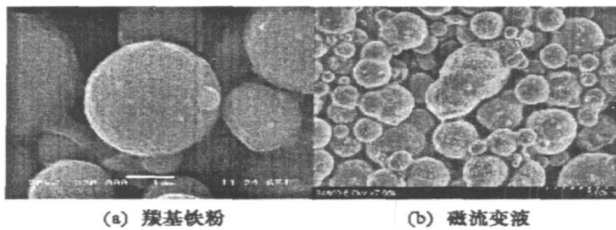


图1 羰基铁粉、水基磁流变抛光液的扫描电镜图

Fig. 1 SEM of Carbonyl Iron (CI) and water-based MR polishing fluid

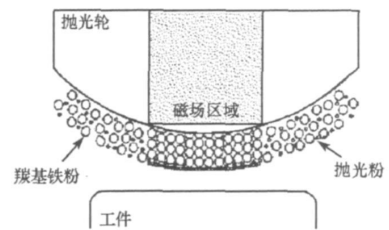


图2 磁流变抛光液经过抛光区示意图

Fig. 2 Sketch map of MR fluid in work zone

传统抛光材料去除机理主要存在三种理论:机械作用理论、化学作用理论和表面流动理论^[2]。三种理论都有其一定的正确性和局限性,三者解释各种抛光机理中需要相互补充。机械作用理论^[3]认为抛光与研磨的本质相同,抛光是研磨的继续,区别只是在于磨料的粒度减小,导致材料表面的切削力减小,表面粗糙度降低。此理论主要采用了两种模型:“挤压断裂”模型与“剪切刮擦”模型。化学作用理论^[4]认为水与玻璃表面能够发生水解反应,生成一层硅胶层,并在溶液中释放出 OH^- ,这些 OH^- 通过表面、亚表面的裂纹与孔隙进入到材料内部,破坏化学键,使材料受到不断的侵蚀。同时,抛光液中的抛光粉颗粒不断地刮去表面的硅胶层,露出新的材料表面,如此反复形成了材料的去除过程。流变理论^[5]基于抛光过程中摩擦热产生的塑性变形与热软化产生的流动性,认为抛光过程是材料表面分子的重新分布,分子的流动将材料的凸起用来填平凹陷处,最终形成光整的表面。研究表明只要单个磨粒上的法向受力超过一临界值,就会产生中位或径向裂纹,在材料表面或亚表面形成损伤层,并可能在卸载时诱发横向裂纹导致材料去除,此时材料的去除模式称为脆性去除模式;低于此临界值,则磨粒与工件之间只会发生弹性或塑性接触,不会有表面或亚表面裂纹产生,此时通过磨粒与工件之间的滑擦作用实现材料去除,这种材料去除方式称为塑性去除模式。磁流变抛光中单个抛光颗粒的受力约为 10^{-7}N ^[6],比一般光学材料的临界力^[7](约为 10^{-2}N)要小得多,因此,磁流变抛光材料去除方式为塑性去除模式^[5-6]。采用不同的磁流变液(磨料种类、粒径、pH值)、抛光不同的材料时,磁流变抛光的化学作用、表面流动作用会有所不同。例如,磁流变抛光K9玻璃和SiC材料,前者水解层能达到100nm^[8],后者化学稳定性强,无水解层^[9];磁流变液的pH值在4~10变化时K9玻璃的去除效率变化在30%以上,而SiC材料的去除效

率和表面粗糙度均没有明显变化^[10]。例如,采用纳米金刚石磨料时,机械去除作用显著,表面流动作用不明显,而采用纳米氧化铈磨料时,表面流动效应显著。DeGroot^[11]研究表明,纳米金刚石磨料磁流变抛光过程的材料去除机理是塑性剪切去除,材料以“剪切刮擦”的形式去除。由于材料表面存在高低不平的凸起,磨料随磁流变液的流动中通过“切向力”的剪切作用刮擦粗糙的材料表面,并带走切屑,得到光滑表面。图3(a)、图3(b)分别为利用纳米金刚石磨料抛光后的CVD SiC和K9材料表面的粗糙度测量得到的微观分布图。可见,材料表面在磨料的剪切去除的过程中,发生塑性变形,形成一条条“沟痕”,称之为“耕犁(犁削)”现象,验证了纳米金刚石磨料磁流变抛光的塑性剪切去除机理。

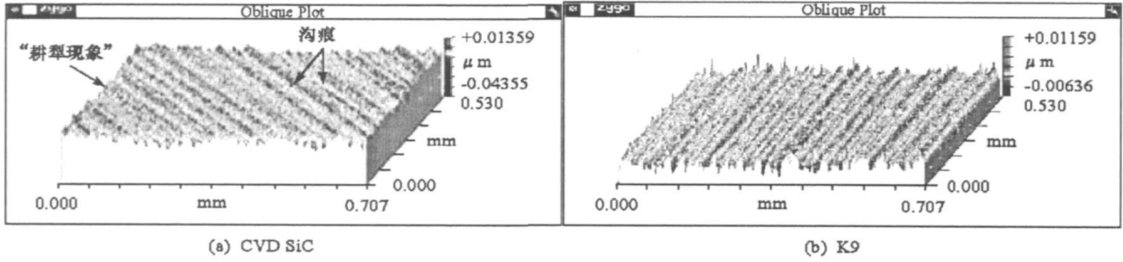


图3 纳米金刚石磨料抛光后的材料表面

Fig. 3 Surface of material after nano-sized diamond abrasives

2 工艺参数对磁流变抛光的影响

磁流变抛光过程主要影响因素包括^[12-13,15]: (1) 被抛光材料的物理化学特性、晶相结构、材料表面机械特性、化学稳定性和材料相对结合强度。(2) 磁流变液的组份及其含量(羰基铁粉、抛光粉、稳定剂)、磁流变液的粘度、剪切屈服强度和pH值。(3) 工艺参数(转速、工件与抛光轮间隙、磁场等)、抛光区域的磁场、压应力场和剪切应力场的大小及分布。各因素之间还相互耦合,磁流变液会影响材料表面机械特性和化学稳定性,磁场电流会影响磁流变液的粘度和剪切屈服强度。磁流变抛光去除函数是指单位时间内能够去除的工件表面材料,其模型^[17]可以表示如下

$$r = K \left[\frac{-2\eta_0 U k}{(h_{m0} + x^2/2R)^2} + 3\phi\mu_0 \mu_f \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f} \int_0^H H dH \right] \cdot \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{R} \cdot U \quad (1)$$

式中, μ_0 为真空磁导率, H 为磁场强度, η_0 为磁流变抛光液初始粘度, U 为抛光轮线速度, h_{m0} 为抛光轮与工件之间的最小间隙, μ_f 为磁流变抛光液的磁导率, μ_p 为磁性微粒的磁导率, ϕ 为磁流变抛光液中磁性微粒的体积比浓度, R 为抛光轮半径。

去除函数用两个参数描述: P (Peak)为峰值去除率,单位为 $\mu\text{m}/\text{min}$,描述的是去除函数单位时间内所能达到的最大材料去除量; V (Volume)为体积去除率,单位为 $\mu\text{m}^3/\text{min}$,描述的是去除函数单位时间内所去除的材料体积。另外,还有两个尺寸参数, L (单位mm)和 W (单位mm),分别用来描述去除函数二维方向上的最大长度及宽度,如图4所示。固定影响因素(1)、影响因素(2),重点研究工艺参数对峰值去除效率PRR、表面粗糙度RMS的影响。

实验试件为直径100mm的CVD SiC,磁流变液为纳米金刚石磨料磁流变抛光液。选定流量100L/h,粘度0.6Pa·s,磁场电流3A,间隙1.8mm,抛光轮转速选择40r/min、60r/min、90r/min、120r/min、150r/min;选定流量120L/h,粘度0.6Pa·s,磁场电流3A,抛光轮转速60r/min,抛光轮与工件表面间隙选择1.4mm、1.6mm、1.8mm、2.0mm、2.2mm;选定流量120L/h,粘度0.6Pa·s,抛光轮转速60r/min,抛光轮与工件表面间隙1.8mm。磁场电流选择2A、3A、4A、5A、6A。峰值去除效率 P 与抛光轮转速、抛光轮与工件表面间隙、磁场电流关系曲线如图5(a)所示。表面粗糙度RMS与抛光轮转速、抛光轮与工件表面间隙、磁场电流关系曲线如图5(b)所示。

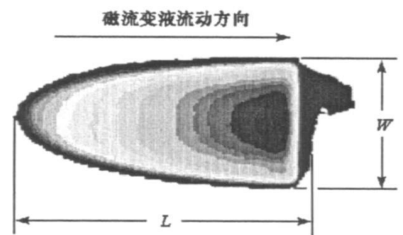


图4 去除函数的尺寸参数示意图

Fig. 4 Sketch map of removal function's size

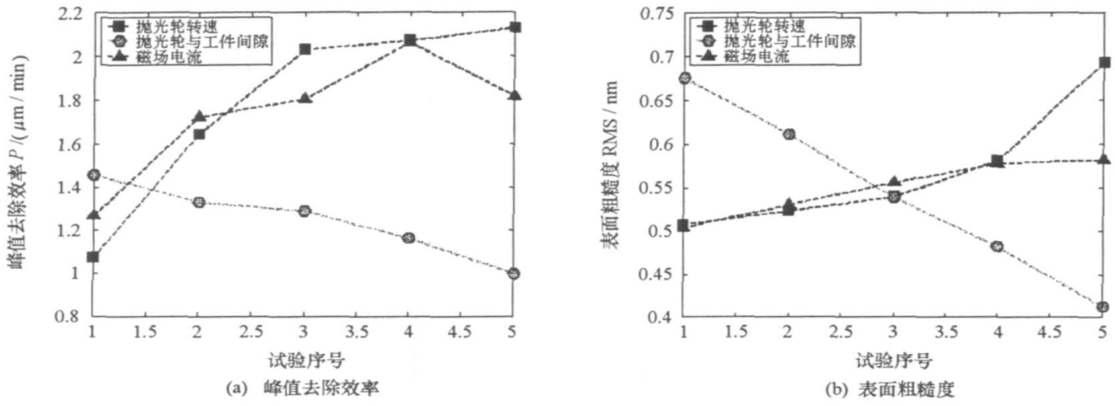


图5 峰值去除效率 P、表面粗糙度 RMS 与工艺参数关系曲线

Fig. 5 Process parameters curve of different Peak Value P and Surface Roughness RMS

由图 5(a) 可知,随着抛光轮转速的增大,峰值去除效率增大。抛光轮转速的增大使磨料单位时间内经过材料表面的次数增加,同时根据流体动力学,抛光区域的压应力场和剪切应力场也会增大,使去除效率增大。随着抛光轮与工件表面间隙的增大,峰值去除效率减小。间隙的增大使工件表面逐渐远离磁极,磁场对抛光液中磁敏颗粒(羰基铁粉)的磁力作用减弱,流体动压力减小,位于磁敏颗粒中的磨料受力减小,对材料的去除能力降低。随着磁场电流的增大,峰值去除效率增大。磁场电流的增大使得磁敏颗粒受到的磁力作用增强,流体动压力增大,位于磁敏颗粒中的抛光粉受力也增大,对材料的去除能力提高。工艺参数对峰值去除效率影响依次为抛光轮转速、磁场强度、抛光轮与工件表面的间隙。

由图 5(b) 可知,随着抛光轮转速的增大,表面粗糙度逐渐增大。转速的提高使得产生划痕的机率增大,同时剪切力的增大也会造成表面粗糙度的增大。随着抛光轮与工件表面间隙的增大,表面粗糙度逐渐减小。间隙的增大使流体动压力减小,磨料受力减小使表面质量得到改善。随着磁场电流的增大,表面粗糙度增大。电流的增大使得磁流变液剪切屈服强度增大,使磨料受到的剪切力增大,表面粗糙度增大。磁场电流达到饱和时(5A 左右),表面粗糙度变化变缓。工艺参数对表面粗糙度 RMS 值影响依次为抛光轮与工件表面的间隙、抛光轮转速、磁场强度。

3 磁流变抛光去除函数稳定性研究

选取两块试件(φ48mm, HIP SiC),分成两组,一块分析短时去除函数的稳定性,即每隔半小时取一个去除函数,分析峰值去除效率 P、体积去除效率 V、最大长度 L 及宽度 W 的变化。一块分析长时去除函数的重复性与稳定性,时间相隔约 24h。

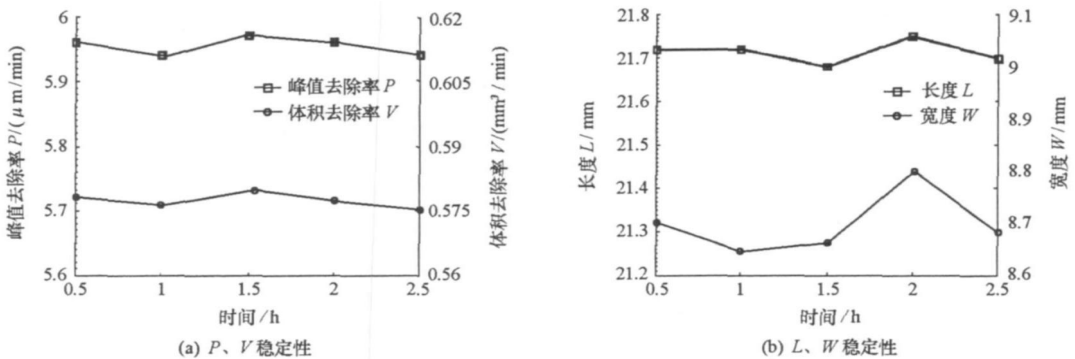


图6 短时去除函数稳定性

Fig. 6 Short-time stability of removal function

由图 6(a) 可知,峰值去除效率 P 的变化范围在 ±0.3% 以内,体积去除效率 V 的变化范围在 ±0.5% 以内,由图 6(b) 可知,长度 L 的变化范围在 ±0.2% 以内,宽度 W 的变化范围在 ±1.2% 以内,稳

定性好。

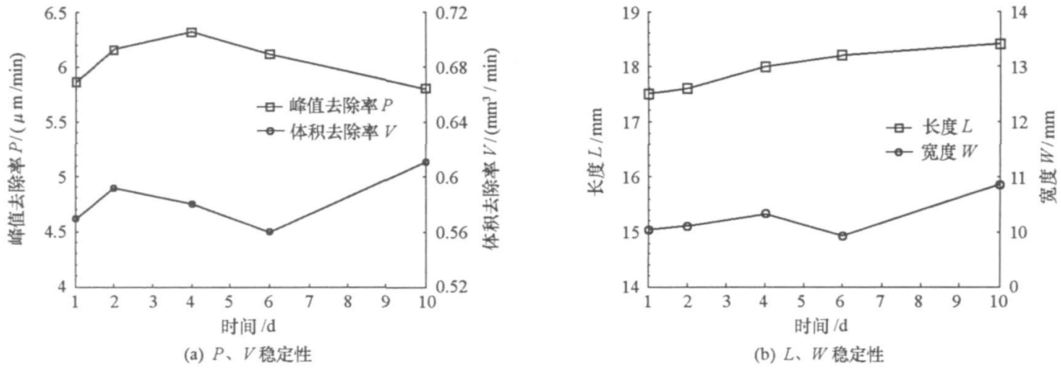


图7 长时去除函数稳定性

Fig. 7 Long-time stability of removal function

由图 7(a) 可知, 峰值去除效率 P 的变化范围在 $\pm 4.5\%$ 以内, 体积去除效率 V 的变化范围在 $\pm 5\%$ 以内, 由图 7(b) 可知, 长度 L 的变化在 $\pm 2.5\%$ 以内, 宽度 W 的变化在 $\pm 4.5\%$ 以内。稳定性的下降主要是由铁粉的沉积、纳米金刚石磨料的损耗等因素引起。

4 磁流变面形误差修正实验

采用自研的 KDMRF-1000F 磁流变抛光机床和平面子孔径拼接测量工作站进行面形误差修正实验^[4]。直径 202mm (有效口径 95%) 的 HIP SiC 平面镜共划分 9 个子孔径。如图 8 所示, 磁流变抛光前初始面形误差峰谷值 (PV) $0.72\mu\text{m}$, 均方根值 (RMS) $0.108\mu\text{m}$, 表面粗糙度 (RMS) 4.088nm 。采用磁流变粗抛与精抛相结合的工艺路线进行加工。粗抛阶段重点实现较高的材料去除效率, 实现面形的快速收敛和亚表面损伤层的高效去除。具体工艺参数: 磁流变液流量 $150\text{L}/\text{h}$, 粘度 $0.7\text{Pa}\cdot\text{s}$, 磁场电流 5A , 电压 40.6V , 抛光轮转速 $100\text{r}/\text{min}$, 金刚石抛光粉粒径 500nm 。如图 9 所示, 经过磁流变粗抛 (30h), 面形误差 PV 值 $0.43\mu\text{m}$, RMS 值 $0.056\mu\text{m}$, 表面粗糙度 RMS 值 3.61nm 。精抛阶段重点控制表面粗糙度并进一步改善面形误差。具体工艺参数: 磁流变液流量 $150\text{L}/\text{h}$, 粘度 $0.5\text{Pa}\cdot\text{s}$, 磁场电流 3A , 电压 29.5V , 抛光轮转速 $60\text{r}/\text{min}$, 纳米金刚石抛光粉粒径 200nm 。如图 10 所示, 经过磁流变精抛 (9h), 面形误差 PV 值 $0.13\mu\text{m}$, RMS 值 $0.012\mu\text{m}$, 表面粗糙度 RMS 值 2.439nm 。

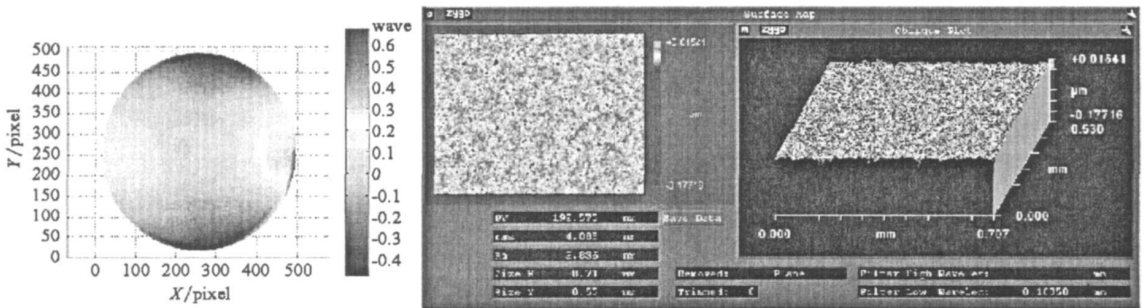


图8 磁流变加工前初始面形和表面粗糙度

Fig. 8 Initial surface residual error and surface roughness before MRF

5 结论

理论分析与实验验证表明纳米金刚石磨料磁流变抛光材料去除机理是塑性剪切去除。在特定的磁流变抛光过程中 (固定被抛光材料与磁流变液), 典型工艺参数对峰值去除效率的影响依次为抛光轮转速、磁场强度、抛光轮与工件表面的间隙; 对表面粗糙度的影响依次为抛光轮与工件表面的间隙、抛光轮转速、磁场强度。KDMRF-1000F 磁流变抛光机床形成的去除函数具有良好的稳定性和重复性, 满足磁

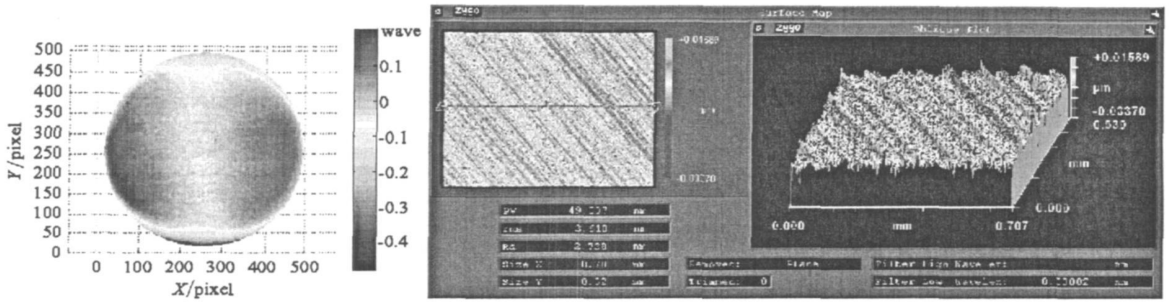


图9 磁流变粗抛后的面形和表面粗糙度

Fig. 9 Surface residual error and surface roughness after rough MRF

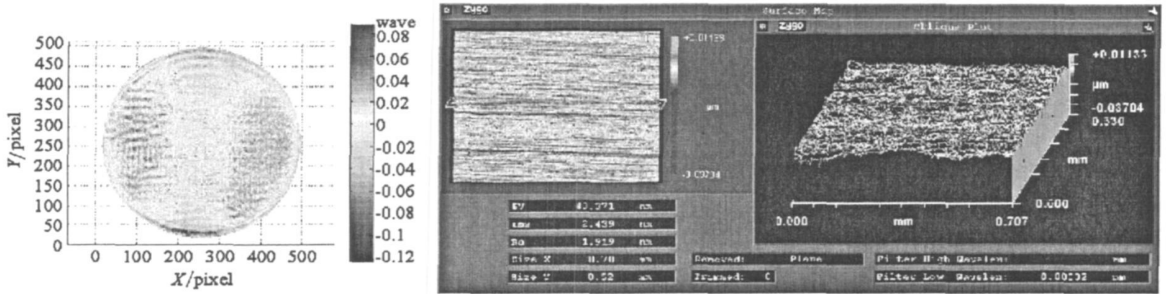


图10 磁流变精抛后的面形和表面粗糙度

Fig. 10 Surface residual error and surface roughness after precision MRF

流变加工的需求。直径 202mm(有效口径 95%) 的 HIP SiC 平面镜采用子孔径拼接测量的方法, 经过磁流变粗抛(30h)和精抛(9h)后, 面形误差 PV 值 0.13 μ m, RMS 值 0.012 μ m, 表面粗糙度 RMS 值 2.439 μ m。

参考文献:

- [1] Hallock B, Dumas P, Shorey A, et al. Recent Advances in Deterministic, Low-cost Finishing of Sapphire Windows[C]//Proc. SPIE, 2005, 5786: 154-164.
- [2] 彭小强. 确定性磁流变抛光的关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.
- [3] 徐进, 雒建斌, 路新春, 等. 超精密表面抛光材料去除机理研究进展[J]. 科学通报, 2004, 49(17): 1700-1705.
- [4] Shorey A B. Mechanisms of the Material Removal in Magnetorheological Finishing (MRF) of Glass[D]. PhD Dissertation. University of Rochester, 2000.
- [5] 张学成, 戴一帆, 李圣怡. 基于 CFD 的磁射流抛光去除机理分析[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(4).
- [6] 戴一帆, 尚文锦, 周旭升. 计算机控制小工具抛光技术中磨盘材料对去除函数的影响[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(2): 97-101.
- [7] 龚江宏. 陶瓷材料断裂力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 9.
- [8] 王卓. 光学材料加工亚表面损伤关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
- [9] 范锦. 大口径碳化硅质反射镜数控光学加工的研究[D]. 长春: 中科院长春光学精密机械研究所, 2004.
- [10] 徐清兰, 等. 轻质碳化硅平面反射镜超光滑表面加工[J]. 光电工程, 2004, 31(9): 22-25.
- [11] DeGroot J E. Surface Interactions Between Nanodiamonds and Glass in Magnetorheological Finishing (MRF)[D]. University of Rochester, 2007.
- [12] Kordonski W, Golini D, Dumas P, et al. Magnetorheological Suspension-based Finishing Technology[C]//SPIE, 3326, 1998:527-535.
- [13] 张峰. 几种参数对磁流变抛光的影响[J]. 光学技术, 2000, 26(3): 220-221.
- [14] 丁凌艳. 平面子孔径拼接测量研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 978-985.
- [15] Song Ci, Dai Yi-fan, Peng Xiao-qiang. Research on Polishing Parameters of Magnetorheological Finishing for High-precision Optical Surfaces[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2008, 6(6): 424-429.
- [16] 刘志军. 碳化硅镜面材料的磁流变抛光工艺研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
- [17] 张峰. 磁流变抛光技术的研究[D]. 长春: 中科院长春光学精密机械研究所, 2000.