

文章编号: 0253-2239(2010)01-0198-08

光学镜面磁流变确定性修形的实现

戴一帆 石 峰 彭小强 宋 辞

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 磁流变确定性修形具有高精度、高效率、高表面质量以及近零亚表面损伤的特点。介绍了磁流变修形技术的基本原理和方法,并对磁流变修形中涉及的关键技术进行了讨论。在自研的磁流变修形设备上采用水基磁流变抛光液对一块直径 80 mm 的 K9 玻璃平面进行了磁流变修形实验。经过一次迭代修形(4.39 min)使其面形精度峰谷(PV)误差由初始的 0.144λ 改善到 0.06λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),均方根(RMS)误差由初始的 0.031λ 改善到 0.01λ ,面形收敛率达到 2.81,表面粗糙度 RMS 值达到 0.345 nm。实验结果表明,采用磁流变进行光学表面修形,面形收敛快,面形精度高,表面质量好,可广泛应用于高精度光学镜面加工。

关键词 光学加工;磁流变抛光;磁流变液;滞留时间;去除函数

中图分类号 TH161 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0198

Deterministic Figuring in Optical Machining by Magnetorheological Finishing

Dai Yifan Shi Feng Peng Xiaoqiang Song Ci

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract As a deterministic magnetically assisted polishing method, magnetorheological finishing (MRF) has the ability to produce optical surfaces with high form accuracy, high efficiency and low sub-surface damage. The principle and method of MRF process are introduced and the key techniques required to implement a MRF process are also discussed. To demonstrate a MRF process, one K9 flat (80 mm in diameter) is polished with KDMRF-1000F polishing machine and KDMRW-1 water based magnetorheological (MR) fluids. Through one MRF iteration (4.39 min), its form accuracy peak-to-valley (PV) error is improved from initial 0.144λ to final 0.06λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), root-mean-square (RMS) is improved from initial 0.031λ to final 0.01λ , surface iterative convergence ratio is 2.81 and roughness RMS is 0.345 nm. The result shows that MRF is a deterministic process, which results in high form accuracy, surface roughness and high efficiency.

Key words optical machining; magnetorheological finishing (MRF); magnetorheological fluids; dwell time; removal function

1 引 言

现代光学系统对光学元件的形状精度、表面质量、亚表面质量、残余应力等性能指标的要求日益提高,传统光学加工方法已很难适应现代光学制造的需求。针对传统光学零件加工方法的缺点,出现了很多先进光学制造方法^[1],主要包括小磨头数控研抛^[2]、应力盘抛光^[3,4]、气囊抛光^[5]、磁流变抛光(MRF)^[6,7]

和离子束抛光^[8]等确定性光学研抛技术。

磁流变抛光技术作为一种新型的先进光学制造技术,具有高效率、高精度、高表面质量、亚表面损伤小、表面残余应力小等一系列优点,具有良好的应用前景。磁流变抛光技术是由美国 Rochester 大学 COM 光学加工中心首创,由美国 QED 公司完成产品化的新一代光学元件高精度抛光加工方法。该抛

收稿日期: 2009-02-21; 收到修改稿日期: 2009-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(50775215,50875256)和部委级基金(9140A18070108KG0147)资助课题。

作者简介: 戴一帆(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事精密工程与计算机控制等方面的研究。

E-mail: dyf@nudt.edu.cn

光方法是智能材料、电磁学、流体动力学、分析化学等理论在光学抛光领域的集中应用。通过控制外加的梯度磁场改变智能材料——磁流变液的粘度与剪切屈服强度,在抛光轮表面形成一个形状可控、“硬度”可调、粘度可变的可控聚束能量流,以该聚束能量流为“柔性抛光模”来实现光学零件的高精度抛光。磁流变抛光技术具有以下优点:1)可以完成光学表面的高精度抛光。采用磁流变抛光方法,光学表面(平面、球面、非球面等)面型精度峰谷值(PV)可达 $\lambda/20$ 以下,表面粗糙度可达1 nm以下;2)磁流变抛光过程的材料去除机理是剪切力为主、压力辅助,磨料微粒对光学表面的物理损伤程度小,表面残余应力小,光学表面基本无亚表面损伤层;3)磁流变抛光以聚束能量流的形式完成抛光过程,不存在传统抛光方法的抛光头磨损、抛光区域温度上升、抛光过程不可控等一系列问题;4)理论上,磁流变抛光方法不受抛光工件几何形状、外形尺寸大小等限制,可完成任何面型的光学零件抛光。

2 原理和方法

2.1 加工原理

自行研制的磁流变抛光机床 KDMRF-1000F 及其基本原理,如图 1 所示。磁流变液在蠕动泵的作用下从喷嘴喷出,由旋转抛光轮带入抛光区域,在梯度磁场(由抛光轮内的电磁铁产生)的作用下形成可控的柔性抛光模,完成材料去除后进入回收装置,经过滤、搅拌后连续循环。

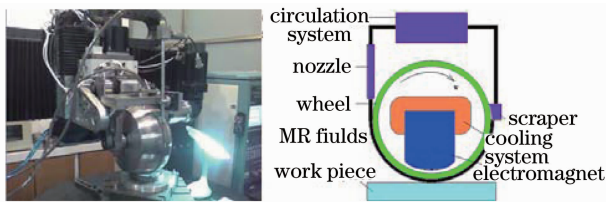


图 1 磁流变抛光样机及其原理图

Fig. 1 MR fluid experimental equipment and its principle

磁流变抛光液在外加梯度磁场的作用下,在抛光轮表面形成“柔性抛光模”,对光学元件表面进行材料去除。典型的磁流变液由微米级的磁性微粒、非磁性载液、稳定剂等成份组成。不加磁场时,磁流变液与牛顿流体相似;在外加磁场时,磁流变液可于瞬间(毫秒级)转变为 Bingham 流体;当撤去外磁场后,磁流变液可立即恢复原状^[6]。

2.2 去除函数

磁流变抛光过程采用计算机控制光学表面成型(CCOS)的工艺方法,需要确定材料去除模型,再根据

选定的驻留时间计算方法,计算出驻留时间并完成路径规划,然后通过数控机床完成加工过程。可见,获取材料去除模型是磁流变抛光的前提和基础。目前获取材料去除模型的方法主要有实验法和数学建模法。实验法由于受到制作工艺繁琐、制作时间长、制作样片材料一致性等因素的限制,其应用具有一定的局限性,但建立的模型准确性较高;数学建模法操作简单、不受样片材料限制,尤其在理论分析方面具有良好的前景,但仿真模型的准确性与实验法有一定差距。在实际应用中,逐步积累、对比实验法和数学建模法获取的去除模型,形成具有一定规模的去除模型数据库,应用该数据库既可以提高模型的准确性,又可以提高模型的制作效率,降低模型的制作成本。下面分别介绍这两种模型制作方法。

2.2.1 实验法建立材料去除模型

如图 2 所示,实验法建立材料去除模型的基本方法是差动法。主要步骤包括:测量用于制作去除模型的材料样片(要求与目标工件的材料严格一致)的初始面形,一般要求其面形误差 PV 值小于 $\lambda/4$;控制磁流变抛光模在位置 1~4 依次驻留一定时间;再次测量材料样片的面形,并与初始面形测量数据进行差动法处理。机械定位精度、样片位姿调整精度、样片测量一致性以及后续处理软件的误差修正能力是影响材料去除模型准确性的关键因素。

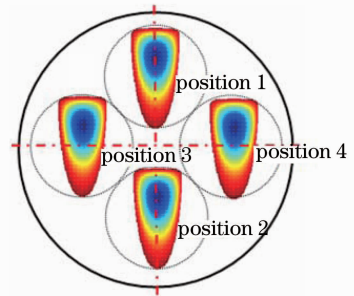


图 2 实验法建立去除模型

Fig. 2 Experimental method to establish polishing spot

2.2.2 数学建模法建立材料去除模型

由于磁流变液的 Bingham 流体特性^[9],抛光区域磁流变液的成核状态、压力场、剪切应力场、速度场的计算十分困难。抛光区域的磁流变液可采用修正的二维雷诺方程来描述^[10],采用数值迭代的方法进行求解,图 3 为抛光区域工件表面的压力场、剪切应力场分布。由于磁流变抛光的材料去除机理是剪切力为主、压力辅助^[9],可以根据计算出的剪切应力场、压力场分布并结合材料的实际去除情况,确定剪切应力、压力对材料去除的影响能力,最终建立磁流

变抛光材料去除模型。图4为建立的磁流变去除模型仿真结果与实验结果的对比图,可见两者在影响范围、变化趋势、去除效率数值上基本相符,其中

峰值去除效率的偏差约为3%,体积去除效率的偏差约为8%。

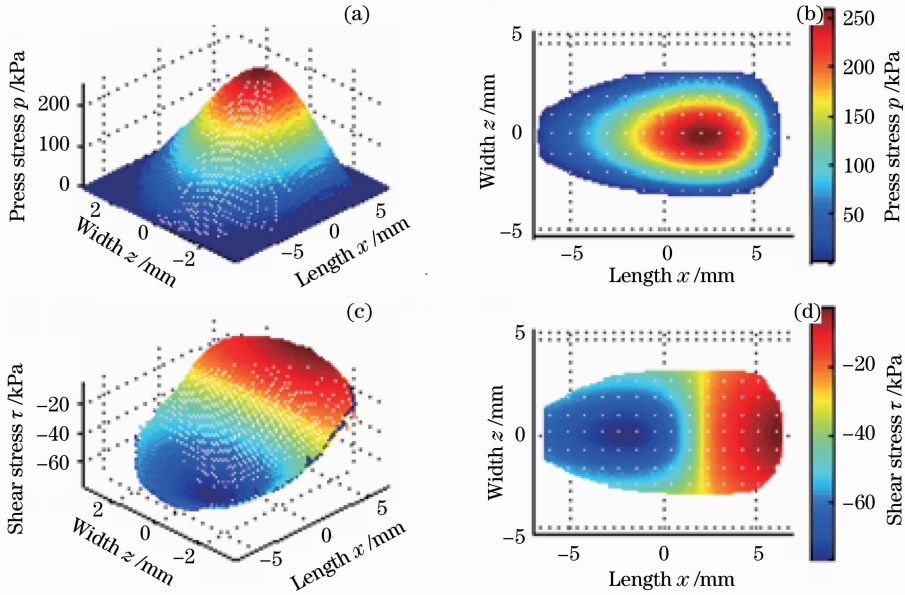


图3 抛光区域工件表面的压力场(a),(b)、剪切应力场(c),(d)分布

Fig. 3 Press stress (a), (b) shear stress (c), (d), distribution in the polishing area

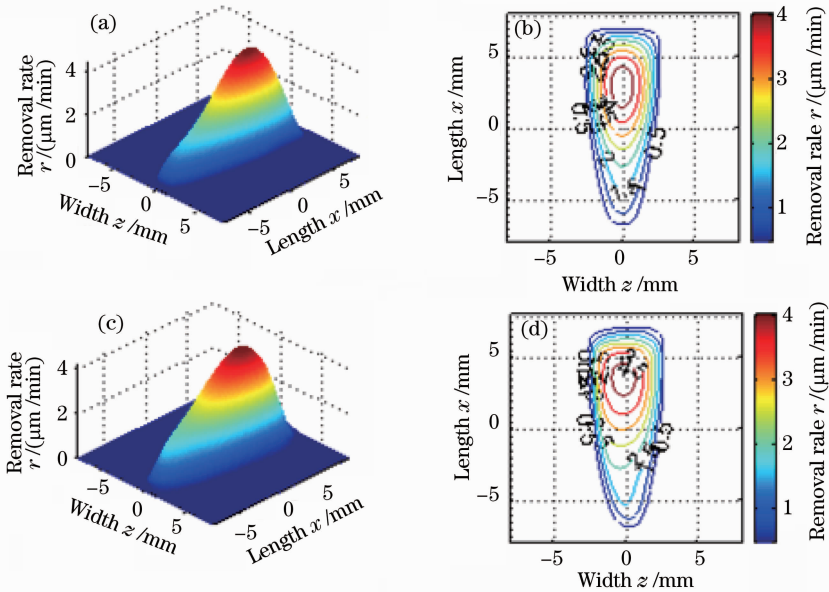


图4 模型结果(a),(b)与实验结果(c),(d)对比图

Fig. 4 Comparison between theoretical (a), (b) and experimental (c), (d) results

3 关键技术

3.1 磁流变抛光液

自研的KDMRW-1型水基磁流变抛光液主要由微米直径的羰基铁粉(CI)、非磁性抛光粉和基载液组成,其中羰基铁粉的扫描电镜(SEM)和粒径分

布如图5所示。由图5可见,羰基铁粉表面光滑,分布均匀,粒径主要分布在3~5 μm。混和后的磁流变抛光液的扫描电镜如图6所示。由图6可见,经过球磨分散后,抛光粉与羰基铁粉颗粒混合均匀,无结块、团聚现象。

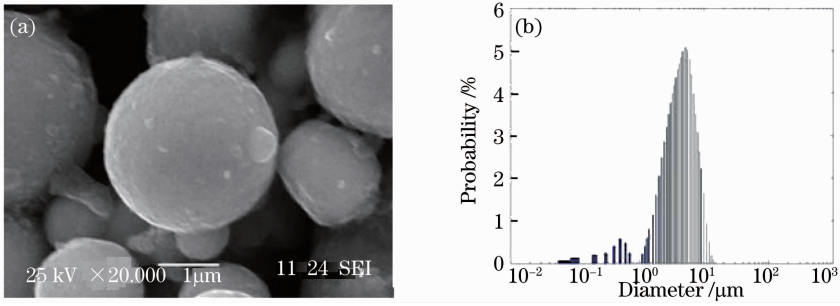


图 5 羰基铁粉的 SEM 图(a)和粒径分布图(b)

Fig. 5 SEM image (a) and particle size distribution figures (b) of CI particles

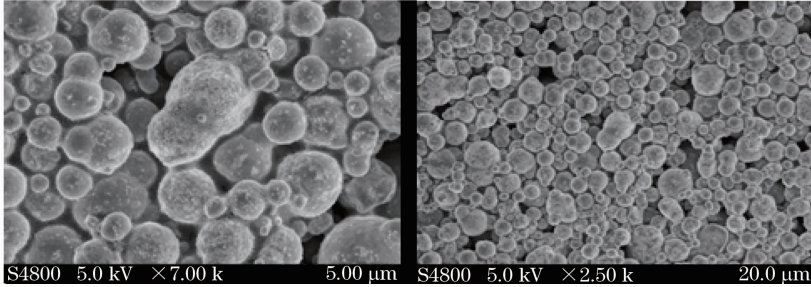


图 6 KDMRW-1 水基磁流变抛光液扫描电镜图

Fig. 6 SEM figures of KDMRW-1 water based MR fluids

采用自主开发的磁流变液流变性测试仪,可以测试磁流变液在磁流变抛光工作方式下的流变学性能。水基磁流变抛光液 KDMRW-1 的剪切屈服强度测试结果,如图 7 所示。随着剪切率的增大,磁流变液的剪切屈服强度有所下降,即“剪切至稀”效应,但自研的水基磁流变液的工作剪切屈服强度(磁场强度为 300 mT)可稳定维持在 30 kPa 以上,适宜进行磁流变加工。

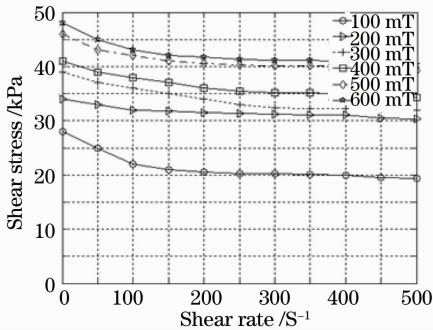


图 7 KDMRW-1 水基磁流变液的剪切屈服强度

Fig. 7 Shear yield stress of KDMRW-1 water based MR fluids

3.2 基于稀疏矩阵的驻留时间算法

如图 8 所示,对光学表面进行离散式网格划分,可得一系列控制节点 p_i ,按相应规则可定义其控制面积 a_i 。定义控制节点向量 $\mathbf{P} = [p_1, \dots, p_i, \dots, p_m]^T$,驻留点向量 $\mathbf{L} = [l_1, \dots, l_k, \dots, l_n]^T$ 。定义去除

向量 $\mathbf{F}^k = [F_1^k, \dots, F_i^k, \dots, F_m^k]^T$,表示去除函数位于驻留点 l_k 时,对所有控制节点的材料去除能力,则任意控制节点 p_i 处的去除效率 F_i^k 为

$$F_i^k = \frac{1}{a_i} \int_{S_{in}} D(\rho, \theta) d\rho d\theta, \quad (1)$$

式中 $D(\rho, \theta)$ 为去除函数的分布函数, S_{in} 为 a_i 在去除函数内部的区域,显然,当 p_i 位于去除函数外部时, $F_i^k = 0$ 。

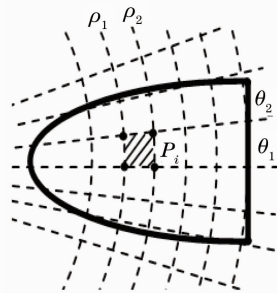


图 8 光学表面离散网格示意图

Fig. 8 Schematic of the divided mesh of optical surface
定义去除矩阵 $\mathbf{F}_{m \times n} = [\mathbf{F}^1, \dots, \mathbf{F}^k, \dots, \mathbf{F}^n]$, 则

$$\mathbf{F}_{m \times n} = \begin{bmatrix} F_1^1 & F_1^2 & \dots & F_1^i & \dots & F_1^n \\ F_2^1 & F_2^2 & \dots & F_2^i & \dots & F_2^n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ F_i^1 & F_i^2 & \dots & F_i^i & \dots & F_i^n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ F_m^1 & F_m^2 & \dots & F_m^i & \dots & F_m^n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

如图 9 所示,加工中去除函数沿一定的加工路径在各个驻留点依次驻留。定义驻留时间向量 $\mathbf{t} = [t_1, \dots, t_k, \dots, t_m]^T$, 材料去除量向量 $\mathbf{R} = [R_1, \dots, R_i, \dots, R_m]^T$, 则有 $\mathbf{F} \cdot \mathbf{t} = \mathbf{R}$, 即

$$\begin{bmatrix} F_1^1 & F_1^2 & \dots & F_1^j & \dots & F_1^n \\ F_2^1 & F_2^2 & \dots & F_2^j & \dots & F_2^n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ F_i^1 & F_i^2 & \dots & F_i^j & \dots & F_i^n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ F_m^1 & F_m^2 & \dots & F_m^j & \dots & F_m^n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_j \\ \vdots \\ t_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_i \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix}, \quad (3)$$

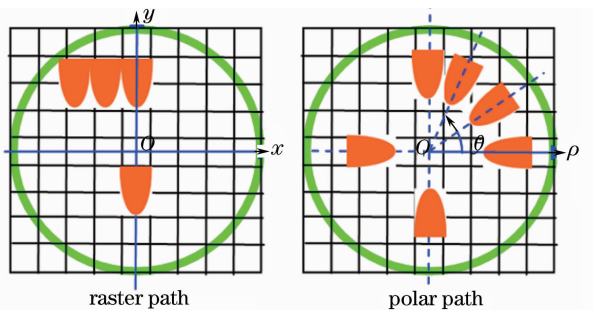


图 9 磁流变抛光路径规划

Fig. 9 Path design for the MRF process

(3) 式为驻留时间求解问题的线性方程组描述。驻留时间求解属于线性方程组不适定问题, 系数矩阵 \mathbf{F} 的条件数很大(病态), 此类问题常采用正则化的方法, 对原不适定问题中的算子附加一个适当的小扰动项, 使之正则化(稳定化), 然后证明相对最优特解的存在性、唯一性和稳定性。通常的 Tikhonov 正则化法、TSVD 正则化法、双参数正则化法、小波正则化法、Landweber 迭代正则化法以及其它的一些改进方法, 国内已有相关应用报导, 中国科学院长春光学精密机械研究所邓伟杰等采用 Tikhonov 正则化方法解算 CCOS 抛光过程驻留时间, 国防科学技术大学周林等^[8]采用 TSVD 正则化方法解算离子束抛光驻留时间。但是, 直接正则化法求解驻留

时间, 随着系数矩阵 \mathbf{F} 维数的增加, 方法复杂度急剧上升, 计算时间过长; 迭代正则化法求解驻留时间, 具有良好的应用前景, 目前未见相关报道。

磁流变抛光是一种典型的小工具抛光, 去除函数的空间尺度远小于光学表面的口径, 采用通常的网格划分方法, 系数矩阵 \mathbf{F} 将成为稀疏矩阵。尤其在加工大中型光学表面时, 其去除矩阵大型化、稀疏化趋势十分明显, 驻留时间求解问题成为典型的大型稀疏矩阵线性方程组求解问题。目前, 针对大型稀疏矩阵线性方程组的研究已十分深入, 求解方法主要有: GMRES 迭代法、BICG 法、多波前法、LU 直接分解法、QR 分解法、多重网格法, 甚至有专用的求解器, 并且可求解病态矩阵。大型稀疏矩阵的求解速度日益提高, 例如采用 GSS 求解器, 一万阶矩阵数值分解时间 0.01 s, 十万阶 0.1 s, 73 s 分解一个 68 万阶的矩阵。通过以上分析可知, 采用大型稀疏矩阵线性方程组的方法和不稳定问题迭代正则化的方法是较为可行的技术路线, 而且相关研究具有创新性, 其求解精度与计算速度均应优于目前的驻留时间求解方法。在实际磁流变光学加工中, 采用求解大型稀疏矩阵线性方程组的方法来计算驻留时间可以得到满意的求解结果。

4 修形实验

采用自行开发的磁流变抛光机床 KDMRF-1000F 对一块直径 80 mm 的 K9 玻璃平面样镜进行面形误差修正。测试仪器为 Zygo GPX300 波面干涉仪和 Zygo New View 200 轮廓仪。样镜事先经过传统研磨抛光, 其面形精度 PV 值为 0.144λ , RMS 误差为 0.031λ , $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 如图 10 所示。

采用间隔为 1 mm 的矩形网格对该镜面进行离散, 离散后的面形如图 11(a) 所示。具体采用的实验条件为: 磁流变抛光液型号 KDMRW-1, 抛光轮半径 150 mm, 抛光轮转速每分钟 120 转, 磁场电流 6 A,

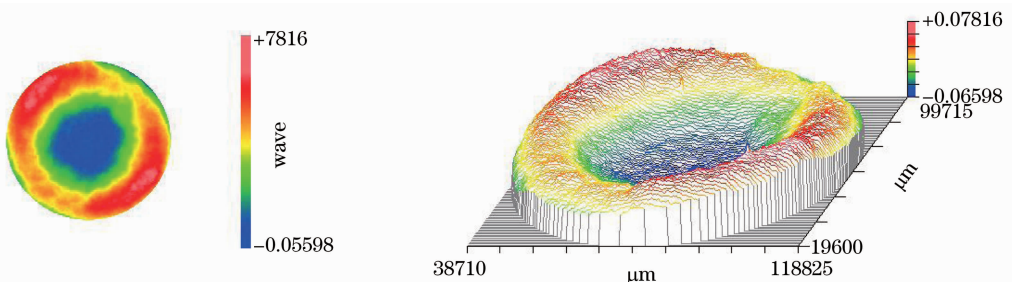


图 10 磁流变修形前的面形测量数据

Fig. 10 Surface figure before MRF figuring

抛光轮与工件间隙 1.0 mm, 获取的去除函数如图 11(b)所示。

根据面形分布的特点和面形精度要求选取适当的额外去除层厚度比 r_e (额外去除层的厚度与初始面形的 PV 值之比) 和机床速度上限 V_{max} 。图 12 为不同机床速度上限的条件下, r_e 对预测面形 RMS 值、PV 值影响的关系曲线。由图 12 可见, 预测面形 RMS 值、PV 值最初随 V_{max} 或 r_e 的增加而迅速减小, 经过某一转折点后趋于稳定。当 $r_e \in [0, 1]$ 时,

预测面形所能达到的最小 RMS 值、PV 值与 V_{max} 的关系曲线, 如图 13 所示。由图 13 可选取 $V_{max} = 8000 \text{ mm/min}$ (转折点)。在此 V_{max} 的情况下, r_e 对预测面形 RMS 值、PV 值、面形收敛比(定义为加工前、后面形精度的 PV 值之比与 RMS 值之比的平均值)的影响关系曲线, 如图 14 所示。由图 14 可选取 $r_e = 0.1$ (转折点)。根据选定的 r_e 和 V_{max} , 计算出的预测面形和驻留时间, 如图 15 和图 16 所示。

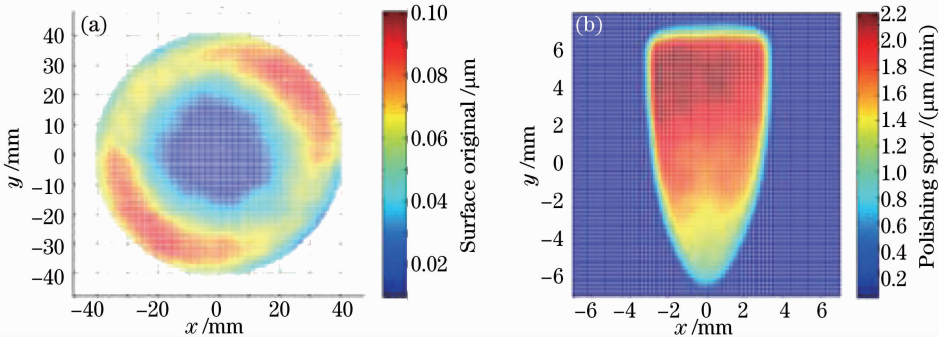


图 11 初始面形(a)和去除函数(b)

Fig. 11 Figures of initial surface (a) and polishing spot (b)

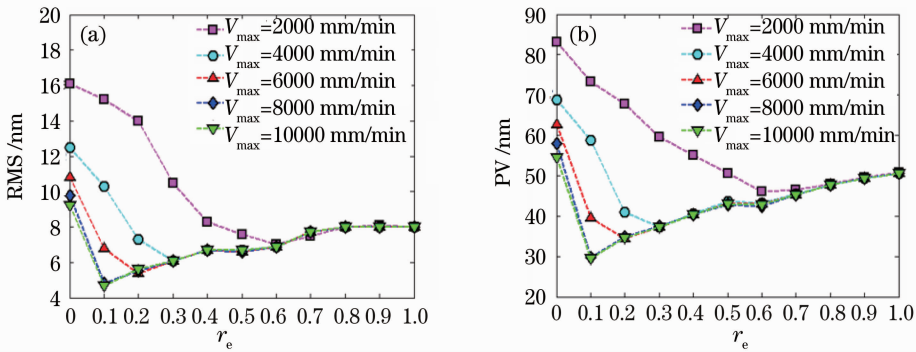


图 12 不同 V_{max} 的条件下, r_e 与预测面形 RMS 值(a), PV 值(b)关系曲线

Fig. 12 Curves of RMS (a) and (b) values versus r_e under different V_{max}

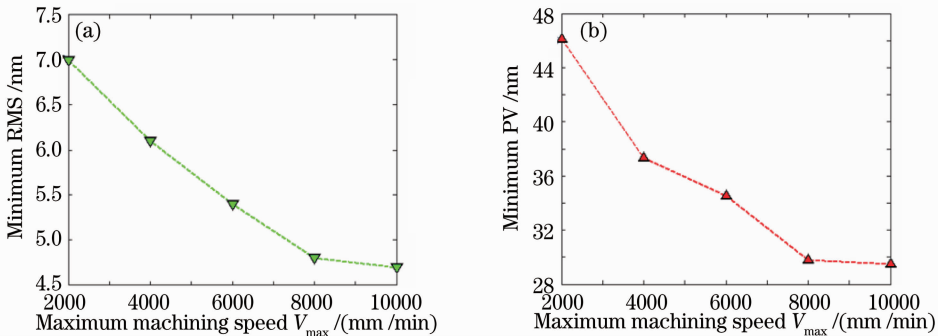


图 13 预测面形所能达到的最小 RMS 值(a), PV 值(b)与 V_{max} 关系曲线 ($r_e \in [0, 1]$)

Fig. 13 Curves of minimum RMS (a) and PV (b) values versus V_{max} under different $r_e \in [0, 1]$

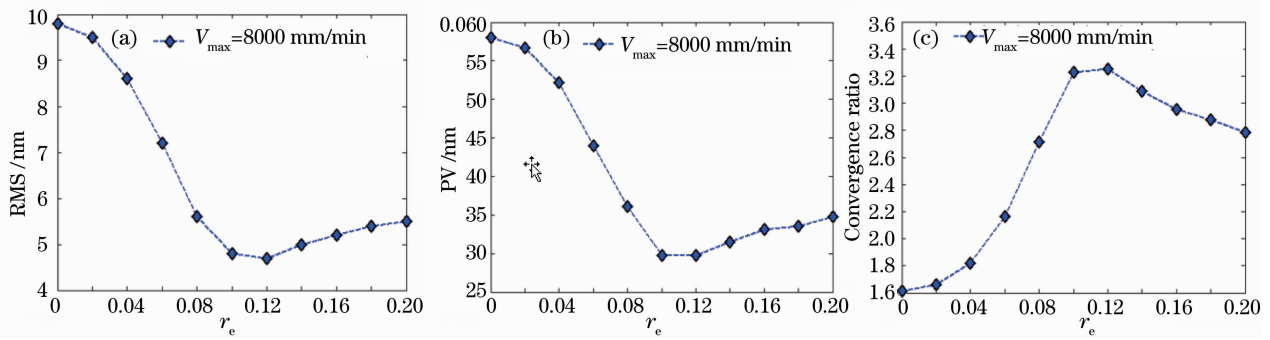


图 14 r_e 与预测面形 RMS 值(a),PV 值(b)、面形收敛比(c)关系曲线($V_{\max}=8000$ mm/min)

Fig. 14 Curves of RMS (a), PV (b) values and surface convergence ratio (c) versus r_e ($V_{\max}=8000$ mm/min)

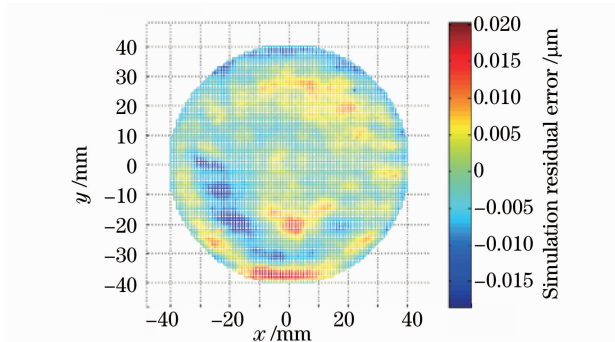


图 15 预测的面形误差

Fig. 15 Figure of simulation residual error

实际加工后的面形残留误差如图 17 所示,面形精度 PV 值为 0.06λ ,RMS 误差为 0.01λ ,面形收敛率达到 2.81。加工后的面形误差值与仿真数值(PV 值 0.047λ ,RMS 值 0.0075λ)有一定的差距,这主要是由于去除函数提取的准确性、去除函数的稳

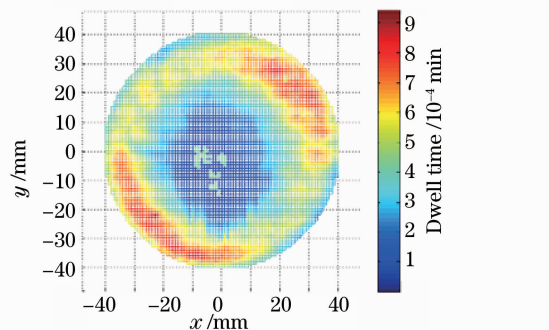


图 16 预测的驻留时间分布

Fig. 16 Figure of dwell time distribution

定性、工艺参数的稳定性、工件装夹、测量重复性等原因造成。加工前的表面粗糙度如图 18(a)所示,表面粗糙度 RMS 值为 0.712 nm,加工后的表面粗糙度如图 18(b)所示,表面粗糙度 RMS 值达到 0.345 nm。

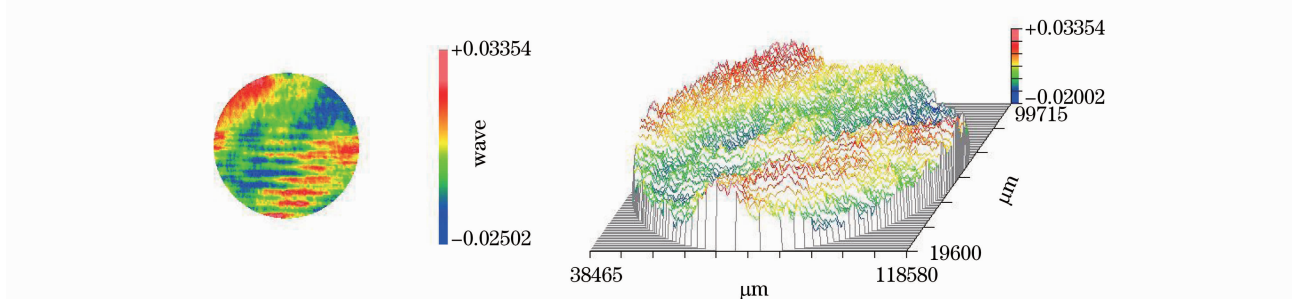


图 17 磁流变变形后的面形误差数据(1次迭代,4.39 min)

Fig. 17 Surface figure after MRF figuring (one MRF iteration, 4.39 min)

5 结 论

应用磁流变进行光学镜面修形的方法,在自研的磁流变加工设备上实现了磁流变修形实验,加工了一块直径 80 mm 的 K9 玻璃平面,经过一次迭代修形(4.39 min)使其面形精度 PV 误差由初始的 0.144λ 改善到 0.06λ ($\lambda=632.8$ nm),RMS 误差由

初始的 0.031λ 改善到 0.01λ ,面形收敛率达到 2.81,表面粗糙度 RMS 值达到 0.345 nm。实验结果表面,采用磁流变进行光学表面修形,面形收敛快、面形精度高、表面质量好,可广泛应用于高精度光学镜面加工。

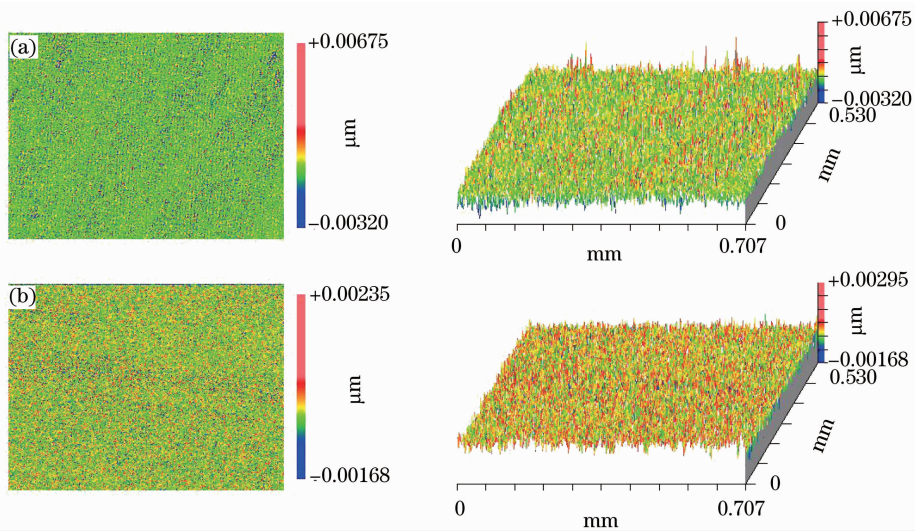


图 18 磁流变加工前(a)和加工后(b)表面粗糙度测试结果图

Fig. 18 Test result of surface roughness before (a) and after (b) MRF polishing

参 考 文 献

- 1 Yang Li. Advanced Optical Manufacture Technology [M]. Beijing: Science Press, 2001
杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社 2001
- 2 Cui Xiangqun, Gao Bilie, Wang Daxing *et al.*. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 402~407
崔向群, 高比烈, 汪达兴等. 一种大口径大非球面度天文镜面磨制新技术[J]. 光学学报, 2005, **25**(3): 402~407
- 3 Fan Bin, Wan Yongjian, Chen Wei *et al.*. Manufacturing features comparing between computer control active-lap and computer control optical surface for large aspherical optics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 128~132
范斌, 万勇建, 陈伟等. 能动磨盘加工与数控加工特性分析[J]. 中国激光, 2006, **33**(1): 128~132
- 4 Gao Bilie. The mathematical analysis for the active lap deformation on proceeding condition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 525~532
高必烈. 对主动抛光盘在加工、测量状态下盘面的变形及提升的数学分析[J]. 光学学报, 2005, **25**(4): 525~532
- 5 Zhang Wei, Li Hongyu, Yu Guoyu. Current situation of ultra-precision bonnet polishing key technology of optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 27~34
张伟, 李洪玉, 于国彧. 光学元件超精密气囊抛光关键技术研究现状[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 27~34
- 6 Zhang Feng, Yu Jinchi, Zhang Xuejun *et al.*. Magnetorheological finishing technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(5): 1~7
张峰, 余景池, 张学军. 磁流变抛光技术[J]. 光学精密工程, 1999, **7**(5): 1~7
- 7 Zhang Feng, Zhang Binzhi. Surface roughness of optical elements fabricated by magnetic fluid-assisted polishing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 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
- 8 Dai Yifan, Zhou Lin, Xie Xuhui *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by ion beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1131~1135
戴一帆, 周林, 谢旭辉等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1131~1135
- 9 A. B. Shorey. Mechanism of Material Removal in Magnetorheological Finishing of Glass [D]. University of Rochester, 2000
- 10 J. Erin, D. Golini. Surface Interactions Between Nanodiamonds and Glass in Magnetorheological Finishing (MRF) [D]. University of Rochester, 2007
- 11 W. I. Kordonski, D. Golini. Multiple application of magnetorheological effect in high precision finishing [J]. *J. Intel. Mat. Syst. Str.*, 2002, **13**(7-8): 401~404
- 12 D. Golini. Precision optics manufacturing using magnetorheological finishing (MRF) [C]. *SPIE*, 1999, **3739**: 78~85
- 13 Hocheol Lee, Minyang Yang. Dwell time algorithm for computer-controlled polishing of small axis-symmetrical aspherical lens mold [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(9): 1936~1943
- 14 J. A. Tichy. Hydrodynamic lubrication theory for the Bingham plastic flow model [J]. *J. Rheology*, 1991, **34**: 477~495
- 15 P. Dumas, C. Hall, B. Hallock *et al.*. Complete sub-aperture pre-polishing & finishing solution to improve speed and determinism in asphere manufacture [C]. *SPIE*, 2007, **6671**: 667111