

文章编号 1004-924X(2016)12-3054-07

大口径平面光学元件的磁流变加工

侯晶^{1,2*}, 王洪祥¹, 陈贤华², 谢瑞清², 邓文辉², 唐才学²

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了实现大口径平面光学元件的高精度加工, 开展了磁流变加工技术的研究。介绍了磁流变加工原理及去除函数的数学模型。根据磁流变加工的特点, 建立了元件整体加工的工艺流程, 给出了元件加工的工艺要素。然后, 开发了抛光斑的提取软件, 并基于轨迹段划分的速度模式开发了工艺软件, 分析了工艺软件的各项功能模块。最后, 基于元件加工的工艺流程, 对一件 800 mm×400 mm 的元件进行了加工实验。利用检测设备测得了元件的低、中、高频的加工指标, 其低频反射波前 PV 值为 34 nm, 中频波前功率谱密度(PSD1)值为 1.7 nm, 高频粗糙度 R_q 值为 0.27 nm。实验显示了较好的实验结果, 验证了利用磁流变加工技术实现了大口径光学元件的高精度加工的可行性。本文还阐述了磁流变加工技术在高功率激光元件中应用的优点。

关键词: 平面光学元件; 磁流变加工; 抛光; 面形精度; 高功率激光器

中图分类号: TN305.2; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162412.3054

Magnetorheological processing for large aperture plane optical elements

HOU Jing^{1,2*}, WANG Hong-xiang¹, CHEN Xian-hua², XIE Rui-qing²,

DENG Wen-hui², TANG Cai-xue²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: houjing1997@163.com

Abstract: The magnetorheological processing was investigated to improve the machining precision of large aperture optical elements. The principle of magnetorheological processing and the mathematical model of removal function were introduced. On the basis of the characteristics of the magnetorheological processing, the whole processing flow of optical elements was established and the technological factors of element process were given. Then, the software for extracting laser spots was developed, the technological software was also proposed based on the orbit segment divided speed mode and functions of modules in the technological software were analyzed. Finally, an element with a length of 800 mm and a width of 400 mm was machined experimentally. The results in low, middle and high frequencies by a test equipment show that the PV value of reflective wavefront in low frequency is 34 nm, the PSD1(power spectrum density) value is 1.7 nm, and the roughness R_q value is 0.27 nm, re-

收稿日期: 2016-10-08; 修订日期: 2016-11-17.

基金项目: 科学挑战专题资金资助项目(No. JCKY2016212A506-0502)。

spectively. These experimental results verify that it is feasible to machine the high precise large aperture optical elements by magnetorheological processing. Moreover, this paper expounds the advantages of magnetorheological processing in high power laser component applications.

Key words: plane optical element, magnetorheological processing; polishing; surface flatness; high power laser

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不断提高,尤其是在惯性约束聚变(ICF)中对光学元件的技术指标要求几乎接近极限。传统光学加工方法已很难满足米级口径元件加工精度及效率的要求。针对传统加工技术的缺点,出现了很多先进的光学制造方法,主要包括小磨头数控抛光、应力盘抛光^[1]和气囊抛光^[2]等技术,这些技术能够保证大尺寸平面元件的加工精度为 $\lambda/3$ (PV)甚至更高,但目前普遍存在元件加工周期长,面形误差收敛过程呈现反复变化的特点,难以实现加工工艺的精确控制,在元件全频段误差一致收敛等问题上也很难满足一致性的要求。

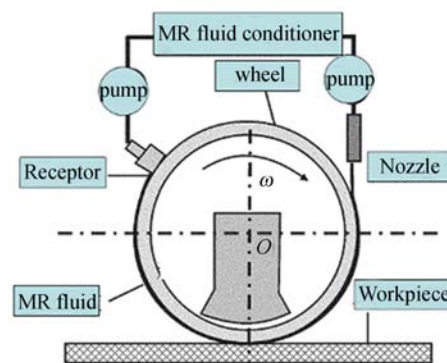
磁流变(MRF)抛光技术作为一种高确定型的先进光学制造技术,具有高效率、高精度、高质量、亚表面损伤小、表面残余应力小等一系列优点^[3,4],具有良好的应用前景。磁流变抛光技术是由美国 Rochester 大学 COM 光学加工中心首创,由美国 QED 公司完成产品化的新一代光学元件高精度抛光加工方法^[5]。该技术利用磁流变抛光液在磁场中的流变性进行抛光,它形成的抛光斑具有很高的稳定性,可实现大口径光学元件的高精度加工。

国外的磁流变抛光设备昂贵,并且他们对用于加工大口径光学元件的设备实行了严格的禁运。国内通过近十年的研发,已具备研制加工大口径光学元件的磁流变设备的能力^[6,7]。本项目利用国产的磁流变设备开展了大口径光学元件加工技术的研究,实现了元件高质量加工。

2 磁流变抛光技术的工作原理

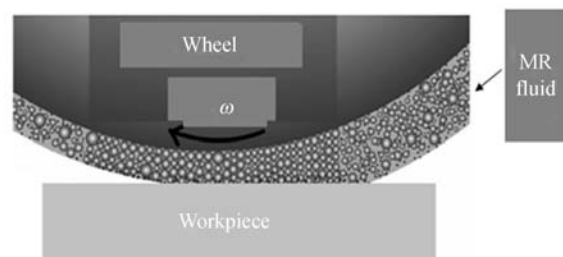
在高强度的梯度磁场中,磁流变抛光液变硬,成为具有粘塑性的 Bingham 介质,并形成缎带凸

起。当这种介质流经过工件与运动盘形成的很小的空隙时,将产生很大的剪切力,从而使工件表面材料被去除^[5]。磁流变抛光具有“柔性抛光”的特点,能够得到高面形精度,高质量的光学表面。并且对环境要求不高,易于实现计算机控制。



(a)磁流变抛光装置原理图

(a) Schematic of MRF device



(b)原理局部放大图

(b) Local enlarged view of MRF device

图 1 磁流变抛光原理图

Fig. 1 Schematic of MRF polishing

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,在外加磁场的作用下,磁流变液可于瞬间转变为 Bingham 流体;当撤去外磁场后,磁流变液又可立即恢复原状。本文基于 Preston 假设,给出了光学抛光过程中的材料去除模型^[8],如式(1)所示:

$$MRR = C_p \cdot p \cdot v, \quad (1)$$

其中: MRR 表示材料去除速率, p 为正压力, v 表示速度, C_p 为 Preston 系数。

基于以上模型可知, 磁流变抛光中的材料去除是抛光粉、基载液和工件三体微观机械化学共同作用下的宏观统计结果。抛光粉在工件表面的剪切作用主宰了材料去除过程, 按照一般的颗粒剪切流分析可得到抛光粉的接触载荷 G_p , 见式(2):

$$G_p = K \frac{\pi}{4} \rho_p d_p^4 \dot{\gamma}^2, \quad (2)$$

其中: ρ_p 是抛光粉密度, d_p 是抛光粉直径, $\dot{\gamma}$ 是剪切率, K 为与抛光液浓度、抛光粉力学特性、基载液流变特性、过程工艺参数等有关系的系数。可见, 材料的去除过程与液流的剪切率密切相关。

目前工程上通常采用实验方法获取磁流变抛光去除函数, 即先在磁流变机床上采斑, 再利用干涉仪等光学检测手段测量获得抛光斑时实际面貌, 进而计算得到当前工艺条件下抛光的去除函数。

3 磁流变加工大口径平面光学元件的工艺研究

磁流变加工光学元件前, 需要完成两项前期工作, 一项是对元件的初始面形误差进行精密测量, 得到待加工元件的初始面形; 另一项工作是与加工元件相同材料的小型元件制作抛光斑, 准确掌握目前加工工艺条件下的去除能力。本文将这两项工作结果作为工艺软件的初始条件, 运行工艺软件, 形成目标程序。具体流程见图 2(彩图见期刊电子版)。以初始的面形检测图和抛光斑函数数据图作为软件的输入条件, 并在软件中设定相关工艺参数, 由软件自动生成程序并模拟面形图, 根据模拟面形图和加工时间等因素, 确定此次加工的效果。如果满足此次工艺加工要求, 则生成执行程序, 利用磁流变设备开展加工过程。在元件加工前, 需要对元件进行精密装调, 避免装调误差对元件加工过程的影响, 在元件加工期间要对抛光液流量、液体浓度以及磁场等因素进行严格控制, 实现抛光斑在整个加工过程中的高稳

定性; 设备完成加工后, 进行面形检测, 如不满足最终指标要求, 需进行二次加工, 经过几次收敛性迭代加工最终完成元件的指标要求。

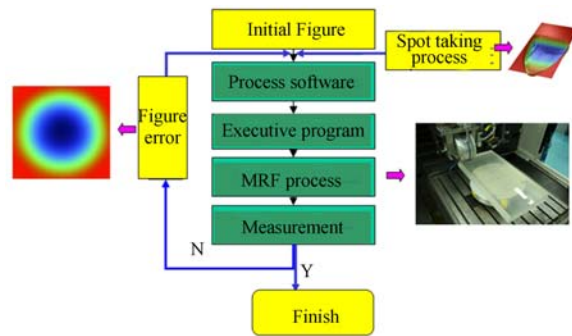


图 2 磁流变工艺流程图

Fig. 2 Schematic of MRF polishing process

在整个工艺流程中有两个关键的工艺技术, 即抛光斑提取工艺和工艺软件的功能作用。下面将针对这两项技术开展软件编制及工艺上的应用。

3.1 磁流变加工去除函数的提取工艺

磁流变抛光技术是一种高确定性的光学精密加工技术, 其高确定性主要来自于其去除函数的高稳定性, 包括各运动轴的高运动精度和抛光液循环系统的温度、流量、压力等工艺条件的稳定控制^[9]。在抛光斑制作完成后, 对去除函数信息的准确提取非常重要, 提取信息的优劣直接影响面形误差的准确去除。本文根据抛光斑的形状尺度开发了抛光斑提取工艺软件, 该软件主要包括去除函数图形处理、去除函数变换、去除函数关键特征量评价等。去除函数图形处理主要完成从抛光斑检测面形中沿抛光斑轮廓将去除函数提取出来, 并保证不丢失图形信息且不增加错误信息, 另外, 还要去除多余的检测面形图。去除函数变换是指根据元件面形加工工艺的需求, 对提取后的抛光斑图形进行旋转、缩放及格式输出等设计。去除函数关键特征量评价主要是计算去除函数的 FWHH(半高宽)、FLHH(半高长)、体积去除效率、峰值去除效率等关键参数, 这些参数对元件加工工艺过程中合适的去除函数选择至关重要。

具体的工艺流程是首先选取初始面形较好的采斑元件(面形 $PV \leq 0.2\lambda$), 用干涉仪检测其初始面形。接着, 在磁流变机床上进行采斑操作制

作抛光斑,再次采用干涉仪检测其结果面形,将初始面形和结果面形进行“相减”处理,得到干净的抛光斑面形。最后,利用抛光斑提取工艺软件提

取并输出满足工艺软件要求的抛光斑函数,并给出抛光斑去除函数的关键特征量,根据工艺需求评价去除效率、抛光斑尺度等信息。

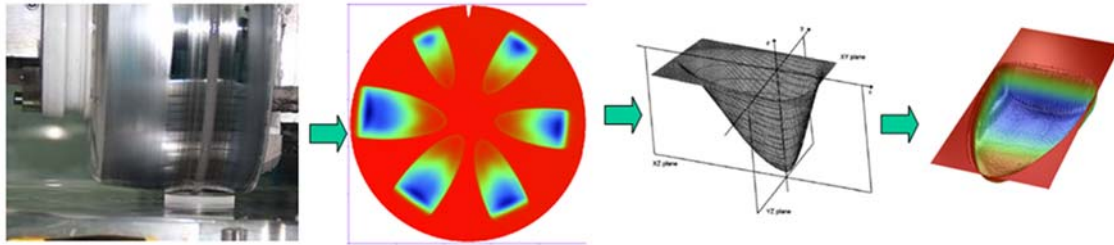


图 3 磁流变抛光斑提取过程

Fig. 3 Taking process of polished spot of MRF

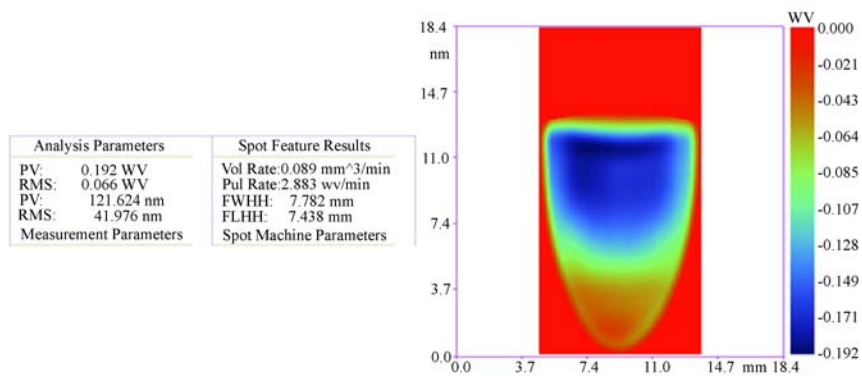


图 4 抛光斑去除函数特征量评价界面图

Fig. 4 Evaluation interface graph of removal function characteristics for polished spot

3.2 磁流变加工的工艺软件功能

磁流变抛光的基本原理是基于 Preston 线性假设,即通过控制抛光工具在元件不同位置的驻留时间实现元件面形的修整。磁流变去除函数的分布是不均匀、非旋转对称的,与旋转对称型去除

函数相比,其处理过程较为复杂。该软件将元件面形的点位驻留时间控制模式改为基于轨迹段划分的速度模式,通过控制每一轨迹段的进给速度进行加工,实现面形的收敛。

该软件具有面形编辑、面形预测、面形修正、

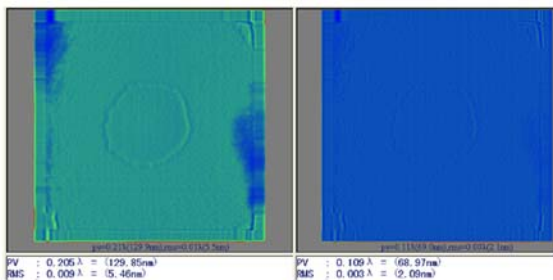
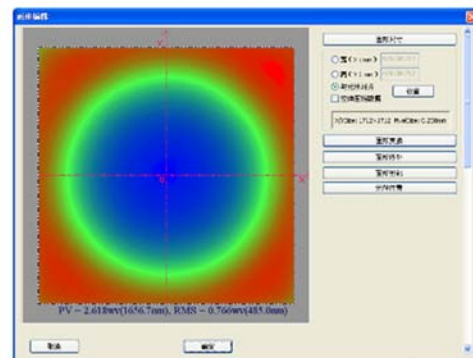


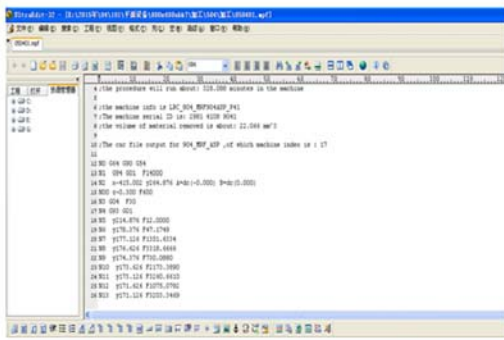
图 5 加工面形与模拟面形软件图

Fig. 5 Real machined surface and simulated surface graphs



(a) 面形编辑界面

(a) Editing interface of surface shape



(b)数控代码生成界面图

(b) NC codes generated interface

图 6 工艺软件界面图

Fig. 6 Interfaces of process optimization software

去除函数制备、数控代码生成 5 大功能模块。其中,面形修正模块是磁流变抛光工艺软件的核心模块,主要包括基础数据预处理、轨迹规划、驻留时间求解、进给速度求解、面形仿真模拟、去除函数预处理等几大算法功能模块。这些功能模块对元件的面形工艺加工提供了有利的技术支持。

4 磁流变加工光学元件实验

采用磁流变加工的工艺流程,利用国产的平面磁流变抛光机床对一件 800 mm×400 mm 的 UBK7 玻璃光学元件,开展了工艺加工实验。

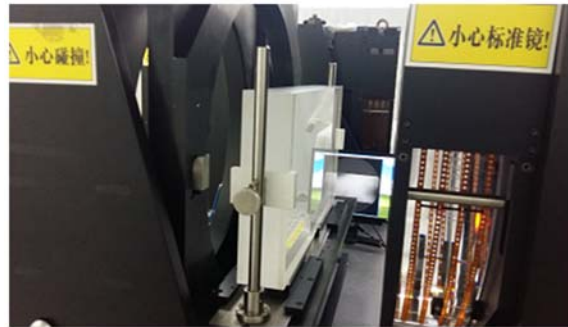


图 6 800×400 mm 元件加工实物图

Fig. 6 Physical map of polishing an 800mm×400mm UBK7 workpiece by MRF

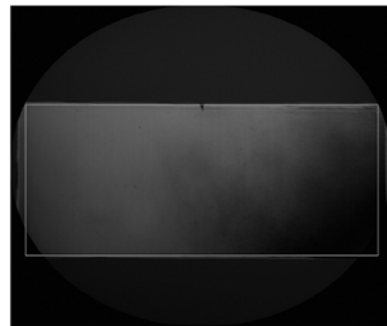
在加工过程中采用的抛光斑体去除效率为 0.15 mm³/min,抛光液的浸入深度为 0.3 mm,抛光液传送量为 1 500 ml/min。利用磁流变工艺软件输出数控程序,完成元件的加工。此外,采用

WYKO 干涉仪和轮廓仪对元件的低频、中频以及高频的结果分别进行了测试。



(a)干涉仪测量实物图

(a) Physical map of interferometer measurement



(b)测量条纹图

(b) Measurement results of fringe image

图 7 WYKO800 干涉仪测试实物图

Fig. 7 Physical maps of workpiece measured by WYKO800 interferometer

采用 WYKO 公司的 800mm 干涉仪对元件的反射波前进行测试。由于该元件是在 45°角度下使用,故测试结果为 45°时的指标结果。

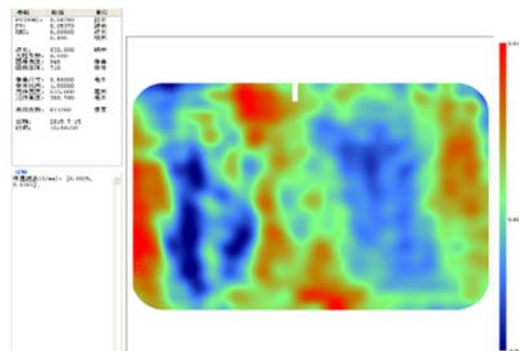


图 8 45°反射波前(PV:34 nm)

Fig. 8 45°reflected wavefront (PV:34nm)

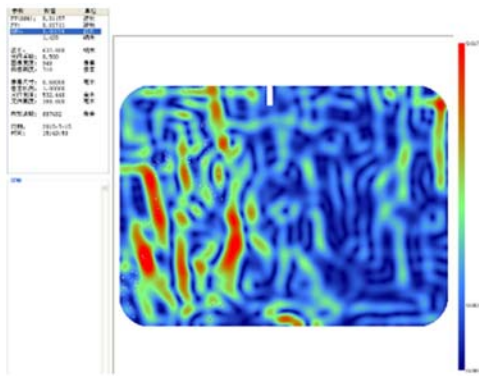


图 9 45°反射波前(GRMS:1/442 λ/cm)

Fig. 9 45°reflected wavefront(GRMS:1/442 λ/cm)

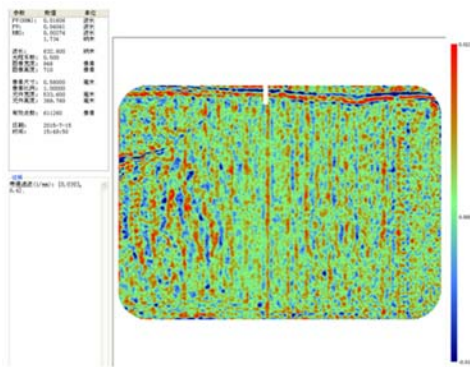


图 10 45°反射波前(PSD1:1.7 nm)

Fig. 10 45°reflected wavefront(PSD1:1.7 nm)

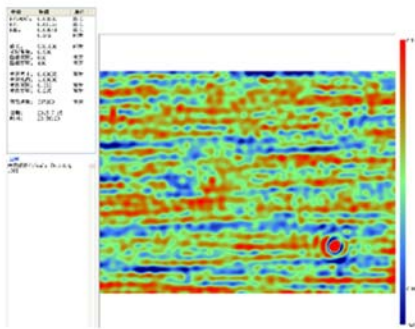


图 11 表面粗糙度(Rq:0.27 nm)

Fig. 11 45°reflected wavefront of the workpiece(Rq:0.27 nm)

由以上检测图可知,反射波前 PV 值为 34 nm,反射波前梯度 GRMS 为 $1/442 \lambda/\text{cm}$,反射波前中频 PSD1 为 1.7 nm,表面粗糙度 Rq 为 0.27 nm。上述结果显示:磁流变抛光技术能够达到很好的表面加工质量,效率也高于传统的加工手段。

5 结 论

本文介绍了磁流变加工原理及去除函数的数学模型。论述了磁流变加工大口径光学元件的工艺流程,在流程中描述了抛光斑的提取工艺及软件,还介绍了磁流变工艺软件的相关功能。利用国产的磁流变抛光设备,对一件 $800 \times 400 \text{ mm}$ 的光学元件开展了工艺实验。通过磁流变的两次收敛性抛光,实现了高质量面形加工,得到了较好的实验结果,并且加工效率也高于传统加工方式(例如小工具数控、环抛)。强激光系统中的光学元件要求阈值较高,磁流变的剪切加工方式可减少亚表面缺陷的产生,同时它还可以去除前道工序产生的亚表面缺陷,更有利于元件的抗损伤能力^[10]。经过磁流变加工后的元件表面有几十纳米深度的铁粒子,可以采用化学清洗的方式进行处理,实现高抗损伤的元件。

参考文献:

- [1] 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.
FAN B, WAN Y J, CHEN W, *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. (in Chinese)

- [2] 张伟,李洪玉,于国成.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.

- ZHANG W, LI H Y, YU G Y. Current situation of ultra precision bonnet polishing key technology of optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1):270-34. (in Chinese)
- [3] 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):34-39.
- ZHANG F, ZHANG B ZH. Surface roughness of optical elements fabricated by magnetic fluid assisted polishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1):34-39. (in Chinese)
- [4] 颜浩, 杨春林, 侯晶, 等. 磁流变加工的连续相位波前及光强特性[J]. *强激光与粒束*, 2014, 26(9):092012.
- YAN H, YANG CH L, HOU J, *et al.*. Wavefront and light intensity characteristics of continuous phase plate fabricated by magnetorheological finishing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(9):092012. (in Chinese)
- [5] KORDONSKI W I, GOLINI D, DUMAS P, *et al.*. Magnetorheological-suspension-based finishing technology [C]. *Proc. of SPIE.*, 1998, 3326, 310670.
- [6] 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.
- ZHANG F, YU J CH, ZHANG X J, *et al.*. Magnetorheological finishing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5):1-7. (in Chinese)
- [7] 徐曦, 杨李茗, 石琦凯, 等. 磁流变加工对中频误差的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(7):1695-1699.
- XU X, YANG L M, SHI Q K, *et al.*. Effect of magnetorheological finishing on mid-spatial frequency error [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(7):1695-1699. (in Chinese)
- [8] KORDONSKI W, GORODKIN S. Material removal in magnetorheological finishing of optics [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(14):1984-1994.
- [9] 杨航, 何建国, 黄文, 等. 磁流变抛光去除函数获取的微分解耦方法[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(8):082005.
- YANG H, HE J G, HUANG W, *et al.*. Differential decoupling method employed in MRF spotting process [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(8):082005. (in Chinese)
- [10] 吕东喜, 王洪祥, 黄燕华, 等. 光学材料磨削的亚表面损伤预测[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3):680-686.
- LV D X, WANG H X, HUANG Y H, *et al.*. Prediction of grinding induced subsurface damage of optical materials[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):680-686. (in Chinese)

作者简介:



侯晶(1977—),男,吉林洮南人,博士研究生,高级工程师,2008年于浙江大学获得硕士学位,现为哈尔滨工业大学的博士研究生,主要从事光学元件的先进制造技术磁流变加工技术的研究。
E-mail:houjing1997@163.com

导师简介:



王洪祥(196—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,1996年、2002年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事超精密加工及检测技术方面的研究。
E-mail:whx@hit.edu.cn