

文章编号: 1001- 2486(2009) 04- 0020- 05

# 基于去除函数预测模型的磁流变抛光工艺优化研究\*

宋 辞, 彭小强, 戴帆, 石 峰

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 在分析磁流变抛光加工过程的基础上, 建立了磁流变抛光的去除函数预测模型, 该模型利用加工前后的面形误差分布和仿真计算的面形残差分布, 针对不同材料间的去除函数模型效率系数进行辨识, 能够实现去除函数模型的准确预测。以该模型为基础, 通过传统磁流变抛光工艺中加入去除函数效率系数实时辨识的工艺环节, 可以对磁流变抛光的加工工艺进行优化。利用该优化工艺对一块口径 202mm 的 HIP SiC 进行 9 次循环迭代加工, 采用子孔径拼接测量技术进行测量, 面形误差由初始的 PV 0.72 $\mu\text{m}$ , RMS 0.108 $\mu\text{m}$  提升到最终的 PV 0.13 $\mu\text{m}$ , RMS 0.012 $\mu\text{m}$ 。实验表明, 去除函数预测模型能够优化磁流变抛光工艺, 提高加工的确性和增强工艺的适用性, 实现光学镜面的高精度确定性磁流变抛光加工。

**关键词:** 磁流变抛光; 去除函数模型; 辨识; 预测

**中图分类号:** TH162      **文献标识码:** A

## Research on Process Optimization of Magnetorheological Finishing Basing on Predictive Model of Removal Function

SONG Ci, PENG Xiao-qiang, DAI Yi-fan, SHI Feng

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

**Abstract:** A predictive model of removal function in MRF has been established based on an analysis of MRF process. According to the residual surface error before and after finishing as well as the simulative residual surface error, this model can identify the efficiency coefficient of removal function with varieties of material and achieve exact prediction of removal function. Based on this model, the MRF process can be optimized by identifying the efficiency coefficient of removal function. A HIP SiC mirror which isin size had been polished nine times with this optimal MRF process. As a result, its residual surface error decreased from PV 0.72 $\mu\text{m}$  and RMS 0.108 $\mu\text{m}$  to PV 0.13 $\mu\text{m}$  and RMS 0.012 $\mu\text{m}$ , tested by sub-aperture stitching technique. The experiments indicate that the predictive model of removal function can optimize MRF process, improve the finishing determinacy and enhance the process flexibility so as to achieve high-precision and deterministic MRF of optical mirror.

**Key words:** MRF; removal function; identification; prediction

磁流变抛光技术是在 20 世纪 90 年代初由前苏联传热传质研究所的 Kordonski 同美国罗彻斯特大学光学制造中心 (Center for Optics Manufacturing, 简称 COM) 的 Jacobs 等合作提出, 并由美国 QED 公司完成概念验证从而形成商业化产品的一种革命性光学零件加工方法<sup>[1-3,9-10]</sup>。磁流变抛光通过控制磁流变液在高强度梯度磁场作用下的粘度、剪切屈服强度以及流变特性等对光学零件表面材料实施剪切去除, 从而完成光学零件的高精度、高效率、低损伤和确定性加工。该技术融合了电磁学、流体动力学以及分析化学的众多理论, 拓展了光学制造方法的外延, 在现代光学制造的发展过程中具有重要的意义。

相比传统的光学加工方法, 磁流变抛光所具有的巨大优势集中体现在它的收敛确定性强。依据 CCOS (Computer controlled optical surfacing) 的原理, 要实现光学零件的确定性磁流变抛光加工, 高精度测量的面形误差是前提, 精确稳定的去除函数模型是保障, 快速收敛的驻留时间求解算法是关键。排除特定需求条件下的光学零件加工, 现代测量技术所提供的波面干涉仪一般都能满足面形误差测量的精度

\* 收稿日期: 2009- 05- 06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50775215, 50875256); 国防科技大学优秀研究生创新资助项目 (B090302)

作者简介: 宋辞 (1983-), 男, 博士生。

要求。同时,CCOS 技术的迅速发展也提供了诸如脉冲迭代法<sup>[4]</sup>、TSVD 法<sup>[5]</sup>、小波法<sup>[6]</sup>、Bayesian 法<sup>[7]</sup>、级数拟合法<sup>[8]</sup>以及正则化方法等多种性能优良的算法,完全能够保证驻留时间的快速求解和残差的高度收敛。另外,磁流变抛光的去除函数模型是一个实时控制、实时更新的“柔性抛光模”,其循环过程能够带走加工中产生的切屑和热量,并且保持粘度、温度以及流量的长时稳定,因此具有较长时间的形状和效率稳定性。传统的磁流变抛光加工工艺是一个“加工——测量——加工”多次反复迭代的过程,其加工的收敛确定性依赖于去除函数的准确获取,因此通常需要与加工工件材料相同的小样件来制作去除函数。然而,在缺乏相同材料的小样件的情况下,去除函数模型的高精度提取变得异常困难。一旦缺乏高精度的去除函数模型作保障,磁流变抛光收敛确定性强的优势势必难以体现。

分析传统的磁流变抛光工艺,可以看出,在对特殊材料进行加工的过程中,其工艺局限性较大,适用性较弱,很大程度上限制了磁流变抛光的确定性优势。而对于去除函数模型的研究,大都局限于理论建模或者曲面拟合,很难用于实际的加工,对于不同材料之间的去除函数预测模型,迄今为止还没有见到相关研究。本文以去除函数预测模型为基础,利用常规材料的去除函数模型对特殊材料的模型进行预测,能够准确获得去除函数模型,实现对传统磁流变抛光加工工艺的优化,因此具有重要的意义。

## 1 去除函数预测模型

磁流变抛光技术的材料去除同样隶属于 CCOS 的范畴,而 CCOS 的理论基础是建立在 Preston 方程之上的。因此,依据 Preston 方程的基本原理,在保持加工工艺参数恒定不变的条件下,光学零件表面的材料去除量为去除函数模型和驻留时间函数沿加工路径的二维卷积过程<sup>[4]</sup>,即

$$h(x, y) = \int_{\alpha} \int_{\beta} r(x - \alpha, y - \beta) \cdot d(\alpha, \beta) d\alpha d\beta + e(x, y) \quad (1)$$

其中  $r(x, y)$  为磁流变抛光的去除函数模型,  $h(x, y)$  为光学零件表面的材料去除量,  $d(x, y)$  为光学零件表面的驻留时间函数,  $e(x, y)$  为光学零件表面的残留误差。

去除函数预测模型基于 CCOS 的基本原理,考虑不同材料间的去除函数形状一致性和效率差异性,引入表征材料去除特性差异的去除函数效率系数,通过初始面形误差分布、理论仿真面形残差分布以及实际面形残差分布之间的内在联系,利用一种材料的去除函数形状作为初始条件,对另一种材料的去除函数效率系数进行辨识,从而得到该材料去除函数模型的形状和效率,完成去除函数模型的准确预测。

式(1)是磁流变抛光加工过程的数学描述,假设材料 A 上的去除函数模型为  $r(x, y)$ ,材料 B 上的去除函数模型为  $r'(x, y)$ ,由于去除函数模型在不同材料上具有形状一致的特性,因此可以定义去除函数的效率系数  $\gamma$  为材料 B 上的去除函数模型和材料 A 上的去除函数模型的比值,即

$$\gamma = r'(x, y) / r(x, y) \quad (2)$$

根据式(2),只要获得材料 A 上的去除函数模型  $r(x, y)$ ,就能得到材料 B 上的去除函数模型,即

$$r'(x, y) = \gamma r(x, y) \quad (3)$$

假设只能利用材料 A 进行去除函数模型的制作和提取,那么通过实验,可以得到材料 A 上的去除函数模型为  $r(x, y)$ ,利用材料 A 上的去除函数模型进行驻留时间求解,可以得到该模型下的仿真面形残差为  $e(x, y)$ ,根据式(1)可知,该仿真面形残差可以表示为

$$e(x, y) = h(x, y) - \int_{\alpha} \int_{\beta} r(x - \alpha, y - \beta) \cdot d(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (4)$$

利用磁流变抛光对材料 B 进行实际加工中,真实的去除函数模型为  $r'(x, y)$ ,由真实的去除函数模型  $r'(x, y)$  在材料 B 上驻留计算得到的驻留时间函数  $d(x, y)$ ,在材料 B 上产生的实际材料去除量势必不等于仿真计算的材料去除量,从而造成实际的面形残留误差也不等于仿真计算的面形残留误差。假设加工后获得的实际面形残差为  $e'(x, y)$ ,那么将真实的去除函数模型  $r'(x, y)$  代入式(1),可以得到实际的面形残差为

$$e'(x, y) = h(x, y) - \int_{\alpha} \int_{\beta} r'(x - \alpha, y - \beta) \cdot d(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (5)$$

将式(3)代入式(5),可以得到加工后的实际面形残差为

$$\begin{aligned}
 e'(x, y) &= h(x, y) - \int_{\alpha} \int_{\beta} \gamma r(x - \alpha, y - \beta) \cdot d(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \\
 &= h(x, y) - \gamma \cdot \int_{\alpha} \int_{\beta} r(x - \alpha, y - \beta) \cdot d(\alpha, \beta) d\alpha d\beta
 \end{aligned} \quad (6)$$

利用式(1)变换可以得到下式:

$$\int_{\alpha} \int_{\beta} r(x - \alpha, y - \beta) \cdot d(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = h(x, y) - e(x, y) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),可以得到加工后实际面形残差为

$$e'(x, y) = h(x, y) - \gamma(h(x, y) - e(x, y)) = (1 - \gamma)h(x, y) + \gamma e(x, y) \quad (8)$$

式(8)反映了在利用材料A获得去除函数模型 $r(x, y)$ 条件下,对材料B进行磁流变抛光加工所得到的实际残留误差。该等式是个一元一次方程,其中 $\gamma$ 是未知量且 $\gamma > 0$ ,光学镜面的初始面形误差 $h(x, y)$ 、仿真计算的残留误差 $e(x, y)$ 以及实际加工的面形残留误差 $e'(x, y)$ 都是已知量。将三个已知参数代入方程(8)求解,可以得到去除函数模型的效率系数 $\gamma$ ,利用式(3),可以得到材料B上的准确去除函数模型,从而实现去除函数模型的准确预测。

## 2 磁流变抛光工艺过程优化

### 2.1 传统工艺流程

参考CCOS的加工工艺流程,传统的磁流变抛光加工工艺与其类似。我们知道,光学加工的工艺流程是一个反复迭代、逐次收敛的过程。同样,磁流变抛光的工艺过程也是如此,所不同的是,磁流变抛光以其稳定可控的去除函数模型,结合小磨头优异的加工特性,具有收敛确定性强、加工精度高的特点。传统的磁流变抛光加工工艺是一个“加工—测量—加工”多次反复迭代的过程(如图1所示),其加工工艺的收敛确定性依赖于面形误差的精确测量、去除函数的准确获取、稳定收敛的求解算法和精确的驻留时间实现。

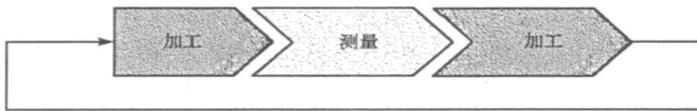


图1 磁流变抛光的传统工艺过程

Fig. 1 Traditional technological chain of magnetorheological finishing

在常规加工中,去除函数的准确获取比较简单,仅仅需要采取与加工工件相同材料的样件进行去除函数模型的制作与提取即可。但是,在对特殊材料进行加工时,很难提供与加工工件材料相同的样件用于去除函数模型的制作,通常的方法是利用常用的K9材料进行去除函数模型的制作和提取,然后根据经验对它们之间的效率系数值进行人为估计。这种估计精度较低,并且受主观影响较大,很难为磁流变抛光提供确定性收敛的支持,不能满足实际加工工艺的要求,容易造成加工中的面形误差收敛困难甚至发散。

### 2.2 优化工艺流程

作为一种革命性的先进光学制造方法,磁流变抛光的优势正好体现在它的收敛确定性上。对于常规材料的加工,在满足其他条件的情况下,利用准确的去除函数能够实现收敛的确定性。但是,对于特殊材料或者特别条件下的加工,没有相同材料的样件用于去除函数模型的制作和获取,因此传统的磁流变抛光工艺显然不能满足光学零件对收敛确定性的要求。已经建立的去除函数预测模型为准确获取特殊材料的去除函数模型提供了理论支持,基于该预测模型,为提高传统磁流变抛光工艺的收敛确定性,很自然考虑引入去除函数模型效率系数辨识环节。在该环节中,利用公式(8),通过加工前后的面形残差以及仿真的面形残差,可以辨识出去除函数模型的效率系数,从而在每次迭代加工的工艺过程中实现对去除函数模型的实时预测和校正,保证磁流变抛光具有收敛确定的性质,同时该工艺流程还降低了特

殊材料的磁流变抛光加工工艺难度,增强了工艺适用范围,如图2所示。

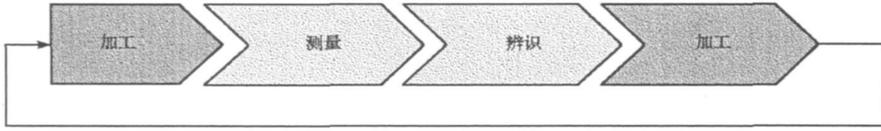


图2 磁流变抛光的优化工艺过程

Fig. 2 Optimistic technological chain of magnetorheological finishing

### 2.3 工艺对比

对比传统的磁流变抛光加工工艺和优化的磁流变抛光工艺,可以看出,在对常规材料进行磁流变抛光时,如果能够准确获取去除函数模型,那么传统的加工工艺就能实现其收敛的确定性。一旦没有准确获取材料的去除函数模型,即使有与加工工件相同材料的样件用于制作和获取去除函数,传统加工工艺同样无法实现高确定性的收敛。对于优化的磁流变抛光工艺,无论是对常规材料还是特殊材料进行加工,由于其工艺加入了辨识环节,能够对材料的去除函数模型进行实时的预测和修正,以保证每次迭代加工总能获取准确的去除函数模型,从而从根本上保证磁流变抛光的收敛确定性。

结合上述分析,可以得出下面结论:磁流变抛光的优化工艺以去除函数预测模型为理论基础,对去除函数模型的效率系数进行辨识,具有普遍适用的特点。该工艺不仅能在对常规材料的磁流变抛光加工中实现去除函数模型的实时修正,而且能够在对特殊材料的磁流变抛光加工中实现去除函数模型的实时预测,从而使得加工过程成为一个自适应去除函数的动态过程,最大程度上保证了磁流变抛光加工的收敛确定性。由于该优化工艺仅仅加入辨识环节,因此实现简单,在不增加原有工艺复杂性的基础上扩大了工艺的适用范围,并降低了对特殊材料加工的工艺难度,因此其具有传统工艺无法比拟的优势。

### 3 HIP SiC 抛光实验

为验证上述预测模型的正确性以及优化工艺的优越性,利用磁流变抛光对一块口径 202mm 的 HIP SiC (图4(a)所示)进行加工实验。采用子孔径拼接测量技术对其进行测量,单个子孔径的测量仪器为 Zygo GPI XP/D,测量精度为 PV  $\lambda$ 100, RMS  $\lambda$ 1000。初始面形误差的 PV 值为  $0.72\mu\text{m}$ , RMS 值为  $0.108\mu\text{m}$ 。由于没有 HIP SiC 的样件材料进行去除函数模型的制作和提取,因此只能采用 K9 材料制作和提取去除函数模型,进而预测出 HIP SiC 上的去除函数模型。根据实际的材料特性和加工经验,预估去除函数的效率系数为  $1/9$ ,通过第一次加工,将初始面形误差(图3(a))、仿真残差(图3(b))以及实际残差(图3(c))代入公式(8)进行效率系数辨识,可以得到效率系数为 0.932,从而得到 HIP SiC 材料同 K9 材料的去除函数模型效率系数为 0.104。利用辨识的效率系数对 HIP SiC 材料上的去除函数模型进行预测,可以得到 HIP SiC 上的准确去除函数模型。

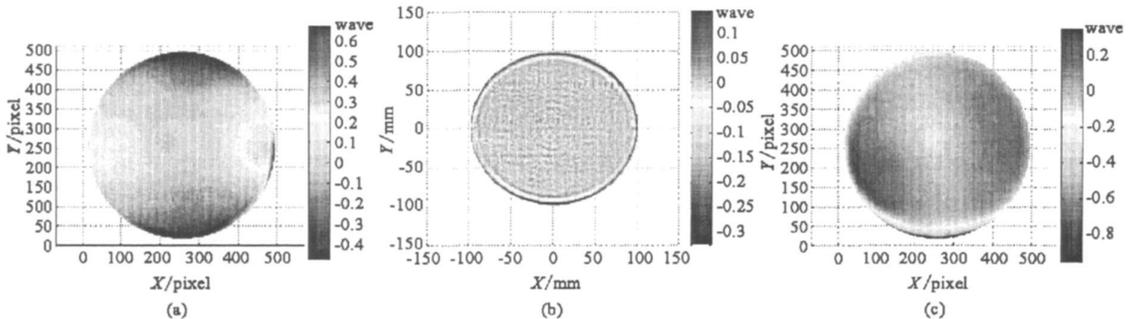


图3 (a) 面形的初始残差, (b) 仿真残差, (c) 实际残差

Fig. 3 (a) Initial residual error, (b) Emulational residual error, (c) Actual residual error

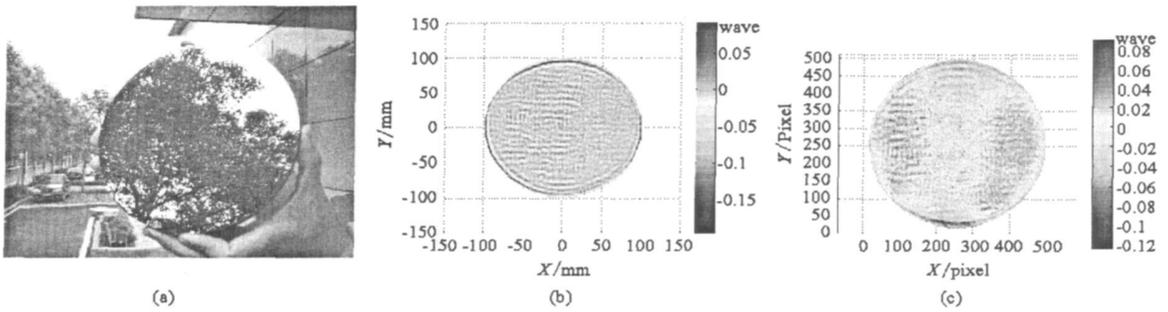


图4 (a) HIP SiC实物图, (b) 最后一次加工的仿真残差, (c) 最后一次加工的实际残差

Fig. 4 (a) Photo of HIP SiC, (b) Emulational residual error of last finishing, (c) Actual residual error of last finishing

表1 去除函数模型效率系数辨识值

Tal. 1 Identification of removal function efficiency coefficient

加工次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
效率系数	0.932	0.992	1.005	1.003	0.998	1.007	0.991	0.995	0.998
相对误差(%)	6.8	0.8	0.5	0.3	0.8	0.7	0.9	0.5	0.2

将第一次加工后所得的面形误差以及预测的去除函数模型进行驻留时间解算, 可以完成下一次的迭代加工。总共经过9次迭代加工, 每次加工都对去除函数模型的效率系数进行辨识, HIP SiC的面形误差得到了很大的改善, 其最后的误差达到了PV值 $0.13\mu\text{m}$ , RMS值 $0.012\mu\text{m}$ , 体现了磁流变抛光高精度的特色。表1列出了每次加工的去除函数模型效率系数的辨识值, 显然, 经过第一次辨识后, 基本得到了准确的去除函数模型效率系数, 因此除了第一次预估系数的相对误差为6.8%之外, 后面8次辨识系数的相对误差均在1%以内。图4(b)和4(c)显示了最后一次迭代加工的仿真残留误差分布和实际残留误差分布, 它们之间的分布具有很强的一致性, 表明由去除函数预测模型能够得到准确的去除函数模型, 有助于提高磁流变抛光的确定性优势, 保证面形误差实现稳定可控的收敛。

## 4 结论

通过常规材料制作和提取去除函数, 利用去除函数预测模型进行效率系数辨识, 能够获得特殊材料准确的去除函数模型。将模型应用于磁流变抛光工艺优化, 能够有效提高磁流变抛光的收敛确定性, 降低工艺复杂程度, 增强工艺的适用范围。该结论同样适用于小磨头研抛、离子束成形、能动盘抛光、射流加工以及气囊抛光等CCOS加工工艺。

## 参考文献:

- [1] Shorey A B. Mechanism of Material Removal in Magnetorheological Finishing of Glass [D]. Ph. D Dissertation of University of Rochester, 2000.
- [2] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 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.
- [4] 周旭升. 大中型非球面计算机控制研抛工艺方法研究[D]. 长沙, 国防科技大学, 2007.
- [5] 周林, 戴一帆, 解旭辉, 等. 离子束加工去除模型和驻留时间算法[J]. 纳米技术与精密工程, 2007, 5(2): 107-112.
- [6] Shanbhag P M, Feinberg M R, Ssndri G, et al. Ion Beam Machining of Millimeter Scale Optics[J]. Applied Optics, 2000, 39(4): 599-611.
- [7] Jiao C J, Li S Y, Xie X H. Algorithm for Ion Beam Figuring of Low-gradient Mirrors[J]. Applied Optics, 2009, 48(21): 4090-4096.
- [8] Drueding T W. Precision Ion Figuring System for Optical Components [D]. Boston University, 1995.
- [9] Pollicove H M, Fess E M, Schoen J M. Deterministic Manufacturing Processes for Precision Optical Surfaces [J]. SPIE, 2003, 5078: 90-96.
- [10] Hallock B, Dumas P, Shorey A, et al. Recent Advances in Deterministic, Low-cost Finishing of Sapphire Windows [J]. Proc. SPIE, 2005, 5786: 154-164.