

基于磁流变技术的微孔内壁 抛光装置研制及性能研究

周悦^{1,2}, 王雨婷¹, 伊福廷¹, 王波¹, 刘静¹, 张天冲¹

(1.中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: **目的** 基于磁流变技术研制适用于微孔内壁抛光的装置。**方法** 利用磁流变抛光液的性质, 借鉴传统的抛光原理, 设计并研制了适用于微孔内壁抛光的抛光装置, 并对该装置进行了一系列的性能研究。基于该微孔内壁抛光装置对多孔镍样品及平片硅样品进行了不同条件下的抛光研究, 并对抛光结果进行了分析。**结果** 此抛光装置的性能研究结果表明, 该装置产生的交变磁场均匀、稳定, 符合模拟预期, 可用于进一步的样品抛光研究。利用此抛光装置, 虽然在多孔镍样品的抛光上没有较为明显的效果, 但平片硅样品的粗糙度却由 1.24 nm 下降至 0.56 nm, 具有较大改善。在平片硅样品的抛光研究中, 进一步发现随着时间的增加, 其粗糙度不断下降。**结论** 自行搭建的基于磁流变技术的微孔内壁抛光装置可对平片硅进行抛光。

关键词: 磁流变技术; 微孔内壁抛光; 抛光装置; 磁感应强度; 粗糙度

中图分类号: TG580.692 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2018)06-0252-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.036

Development and Performance of Equipment for Polishing Inside Walls of Micro-holes Based on Magnetic-field-assisted Polishing Technology

ZHOU Yue^{1,2}, WANG Yu-ting¹, YI Fu-ting¹, WANG Bo¹, LIU Jing¹, ZHANG Tian-chong¹

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

ABSTRACT: The work aims to develop equipment for polishing inside walls of micro-holes based on magnetic-field-assisted polishing technology. The polishing equipment applicable to inside walls of micro-holes was designed and developed by utilizing properties of magnetic-field-assisted polishing solution and drawing on traditional polishing theory. Based upon this polishing equipment, a series of performance studies were performed to the equipment. Polishing studies were applied to porous nickel samples and normal silicon wafers under different conditions, and polishing results were analyzed. Performance study results of the polishing equipment showed that stable gradient alternating magnetic field was generated by the equipment, which coincided with our expectation and could be used for further studies of sample polishing. Though the equipment had no obvious effect on

收稿日期: 2017-12-08; 修订日期: 2018-02-19

Received: 2017-12-08; Revised: 2018-02-19

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金资助 (U1631113)

Fund: Supported by the Joint Research Fund in Astronomy (U1631113) under Cooperative Agreement between the National Natural Science Foundation of China (NSFC) and Chinese Academy of Sciences (CAS)

作者简介: 周悦 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为交流电磁技术及其应用。

Biography: ZHOU Yue (1993—), Female, Master, Research focus: AC electromagnetic technology and applications.

通讯作者: 张天冲 (1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为利用 X 射线光刻技术研制微型光学元件。

Corresponding author: ZHANG Tian-chong (1982—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: fabrication of micro-structures for optical applications based on X-ray lithography.

polishing of porous nickel samples, the roughness of silicon wafers decreased from 1.24 nm to 0.56 nm. Polishing studies of silicon wafers showed that the roughness decreased as time advanced. The self-made equipment for polishing inside walls of micro-holes based on magnetic-field-assisted polishing technology can be used for polishing silicon wafers. The relationship between polishing effect and magnetic field control parameters can be explored subsequently, and the polishing equipment can be applied to polishing of samples with micro-hole structure step by step.

KEY WORDS: magnetic-field-assisted polishing technology; polishing inside walls of micro-holes; polishing equipment; magnetic flux density; roughness

磁流变抛光 (MRF) 技术是 20 世纪 90 年代初, 美国 Rochester 大学光学研究中心的 W. I. Kordonski、I. V. Prokhorov 及合作者发明的^[1]。磁性颗粒在稳定剂的作用下, 稳定悬浮于基液中形成磁流变液, 在磁流变液中加入抛光粉颗粒即为磁流变抛光液^[2]。

磁流变抛光技术是利用了磁流变抛光液在梯度磁场的作用下, 其中的磁性颗粒呈链状排列, 而抛光粉颗粒受力悬浮于基液表面, 从而使磁流变抛光液变硬, 成为具有粘塑性的 Bingham 介质^[3]。这种介质通过工件和运动盘之间的空隙时, 对工件表面形成巨大的剪切力, 从而去除工件表面材料, 实现抛光的目的^[4]。

目前一些领域, 如航天, 在具有特定任务的卫星装载的天文望远镜上, 利用了具有微孔结构的光学元件, 如 MPO 镜片等^[5], 而这些微孔内壁用于反射 X 光, 故而对于具有微孔结构的光学元件内壁抛光就显得尤为重要。传统的机械抛光并不适用于微孔内壁的抛光, 而常规化学抛光不能达到非常高的光洁度水平, 因此选择磁流变技术抛光^[6]。现有利用磁流变技术抛光的设备只能应用于开阔平面或曲面的抛光, 并不适用于微孔抛光^[7-8]。本实验利用磁流变抛光液的性质, 借鉴传统抛光原理及文献报道, 重新设计并研制了微孔内壁抛光装置, 并对其性能进行研究。

1 微孔内壁抛光装置的研制与性能

1.1 微孔内壁抛光装置的设计与研制

借鉴国际上对此类设备的抛光原理^[9], 设计并研制了用于微孔内壁抛光的磁流变抛光设备。图 1 为利用磁流变技术的微孔内壁抛光原理。利用磁流变抛光液中的磁性颗粒在磁场中的往复运动, 推动抛光粉颗粒磨削微孔内壁进行抛光。在磁场中, 磁性微粒受到的力为:

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu} JV \nabla B \quad (1)$$

式中: \vec{F} 为磁性微粒所受到的磁力; μ 为真空磁导率; J 为磁流体的磁极化强度; V 为磁性颗粒的体积; ∇B 为磁场梯度^[10]。由公式可知, 磁性微粒所受

的平动力与磁场梯度大小成正比。为保证磁性颗粒在磁场中能够往复运动, 就必须保证梯度磁场的产生, 因而设计了如图 2a 所示的电路图^[11-13], 并搭建了如图 2b 所示的交流电磁铁, 其频率为 0~50 Hz, 电压可调范围为 0~250 V, 两磁极截面为 40 mm×40 mm, 磁极间距为 40 mm, 磁感应强度瞬间峰值为 0~2500 Gs 可调。为防止交流磁场在磁芯中产生涡流效应的热影响, 磁芯使用片状硅钢材料, 切断大涡流回路, 从而减少欧姆发热效应。二极管的作用是产生梯度磁场的关键。当未加二极管时, 在两磁极截面中心产生的是与激励电流位相同步变化的近似匀强磁场。二极管的使用改变了两路激励电流的位相关系, 产生了梯度磁场。

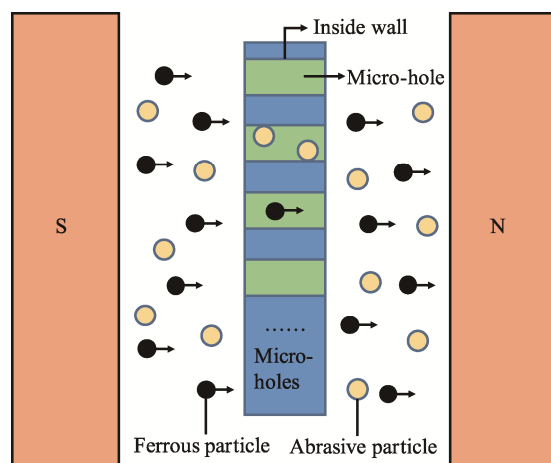


图 1 基于磁流变技术的微孔内壁抛光原理示意图
Fig.1 Schematic of polishing principle based on magnetic-field-assisted polishing technology

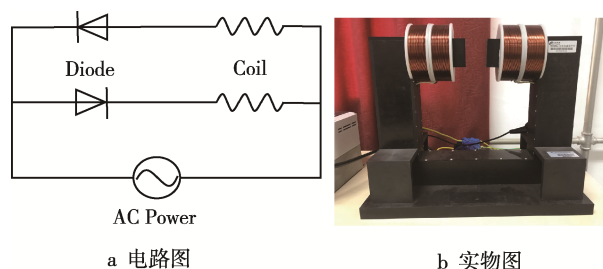


图 2 微孔内壁抛光装置

Fig.2 Equipment for polishing inside walls of micro-holes: a) circuit diagram, b) photograph of the equipment for polishing

1.2 微孔内壁抛光装置的梯度磁场性能表征

梯度磁场可由两路激励电流的位相关系进行判断,若两线圈中的电流存在位相差,则存在梯度磁场。根据图 2a 的电路图,图 3a 模拟了该装置两线圈中的电流大小,由于线圈互感及二极管整流效应,电流 2 不是完全的平滑曲线,而是每周期有部分直线,且电流 1 的高点 A 与电流 2 的直线部分 B 相对应,电流 2 的低点与电流 1 的直线部分相对应,两电流之间的差值随时间变化,从模拟角度上预期了梯度磁场的存在^[14-15]。实际测试时,使用电流钳夹测试两路电流,并同时两磁极中间点的磁感应强度大小进行测试,图 3b 上半部分的电流图与模拟电流的结果一致,磁感应强度曲线表征良好,从实验上证明了梯度磁场的存在,符合模拟预期。

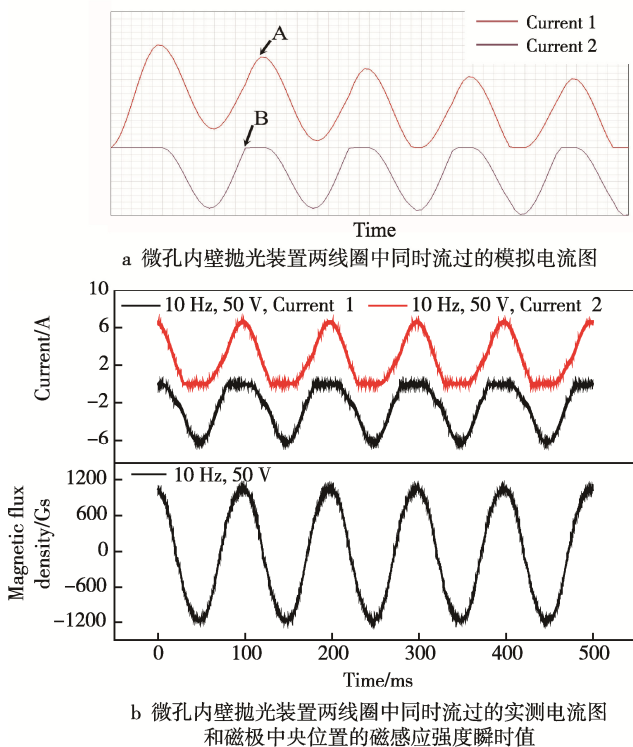


图 3 微孔内壁抛光装置的电流

Fig.3 Current diagram of equipment for polishing inside walls of micro-holes: a) Simulated current diagram for currents in two coils, b) measured current diagram for currents in two coils and instantaneous value of magnetic flux intensity in the central position between two magnetic poles

1.3 微孔内壁抛光装置产生的磁场磁感应强度性能表征

该测试采用三维霍尔探头,连接 PXI-4462 采集卡,用 LabVIEW 软件编程,完成数据采集。对电磁铁两个磁极中间区域的中心点进行磁感应强度的测试,分别测量 5、10、15、20、25、30、35、40、45、

50 Hz 下,电压由 5 V 递增到 250 V 时,磁感应强度曲线的变化情况。将测出的各曲线按照相同频率、不同电压进行分组对比。图 4 为 30 Hz、不同电压下磁感应强度对比图,图注仅给出了部分电压的标注。可以看到在频率相同的情况下,磁感应强度与电压大小呈递增关系。测试符合模拟预期,该抛光装置性能良好,满足下一步实验需求。

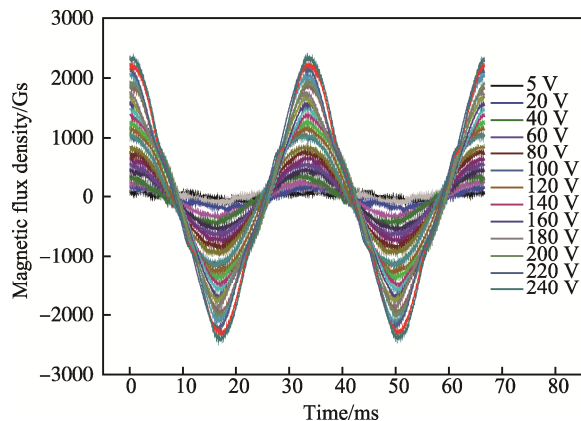


图 4 30 Hz、不同电压下的磁感应强度对比图

Fig.4 Comparison of magnetic flux density at different applied voltages on 30 Hz

1.4 微孔内壁抛光装置产生的空间磁场均匀性表征

将电磁铁和霍尔探头按图 5 摆放,将两磁极中间的区域分为靠近左磁极、中央、靠近右磁极三个平面,每个平面测量 9 个点(3×3 排列),并以数字标定该 9 个点的位置,即中心点(0,0),四角的点(1,1)、(1,-1)、(-1,1)、(-1,-1),以及 4 条边的中点(0,1)、(0,-1)、(1,0)、(-1,0),共计 27 个点,分别测量 27 个点的磁感应强度大小。

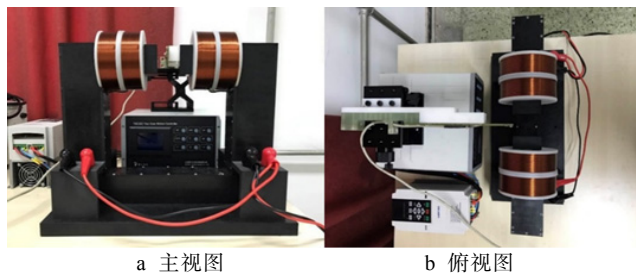


图 5 电磁铁及霍尔探头的摆放

Fig.5 a) Main view, b) top view of electromagnet and Hall probe

实验测试了不同测试面及测试点在不同电压、不同频率下的磁感应强度,以此表征其在空间分布中的均匀性。图 6 给出了 25 Hz、80 V 时,靠一侧磁极平面的 9 个点的磁感应强度大小对比情况。中心点的磁感应强度最大,4 条边中点的磁感应强度次之,4 个角点的磁感应强度最弱。磁感应强度在空间的分布符

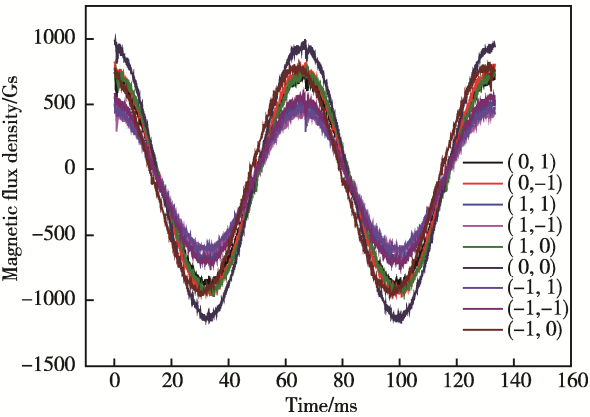


图 6 25 Hz、80 V 时靠近一侧磁极平面内 9 个点的磁感应强度大小对比图

Fig.6 Comparison of magnetic flux density at nine points on the plane near one magnetic pole at 80 V and 25 Hz

合沿磁极线圈轴心最强、离轴心越远越弱的理论预期。测试结果表明，搭建磁铁产生的磁场在空间的分布均匀性较好，待抛光样品放置在磁极轴心附近时，可以获得在垂直于轴心的平面内较均匀的磁场，而沿轴心方向获得交变的梯度磁场。

2 基于微孔内壁抛光装置的抛光

2.1 多孔镍样品抛光

首次抛光测试选用常规电镀材料金属镍，并对具有多孔结构的镍样品进行抛光研究。针对多孔镍样品的结构，设计了用于多孔镍样品抛光的样品托，见图 7。将多孔镍样品固定于样品托上，使其能够完全浸

没在磁流变液中，并使微孔内壁表面平行于电磁铁轴线方向。该多孔镍样品的主要参数如表 1 所示。

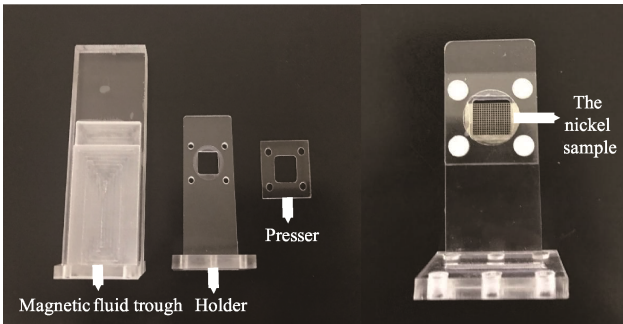


图 7 多孔镍样品的样品托及其安装

Fig.7 Holder of porous nickel samples and its installation

表 1 多孔镍样品主要参数

Tab.1 Main parameters of porous nickel samples

Samples	Value/mm
Side length	0.5
Depth	1
Hole spacing	0.1

在磁流变液中加入不同质量、不同大小的抛光颗粒（金刚石粉颗粒），用匀浆机搅拌均匀，得到不同种类的磁流变抛光液。使用不同种类的磁流变抛光液对多孔镍样品进行不同条件（表 2）下的抛光研究，对比抛光前后均方根粗糙度（ R_q ）的变化情况。表中粒子尺寸为金刚石抛光粉颗粒的平均粒径，粒子质量分数为抛光液中抛光粉的质量分数。

表 2 多孔镍样品的抛光条件及结果

Tab.2 Polishing conditions of porous nickel samples

No.	Frequency/Hz	Voltage/V	Peak magnetic flux density/Gs	Polishing time/h	Particle size/ μm	Particle mass concentration/wt/%	Roughness/nm
1	25	60	650	1.5	0.6	3.6	3.06
2	25	80	900	1.5	0.6	3.6	3.08
3	25	80	900	2	0.6	5	4.38
4	25	80	900	2.5	0.6	30	3.49
5	25	100	1130	1.5	0.6	30	3.36
6	25	120	1430	3	0.22	15	4.06
7	15	70	1300	3	0.6	30	3.17

对该多孔镍样品抛光前后的粗糙度用原子力显微镜（AFM）进行测试并进行对比，该多孔镍样品的表面粗糙度一直维持在 3~4 nm 之间，抛光效果不明显。可能是因为材料镍具有铁磁性，对深入微孔内的空间具有屏蔽磁场的作用，因此采用平片硅样品进行表面抛光研究，可排除材料磁性的干扰，简化抛光体系。

2.2 平片硅样品抛光

平片硅尺寸约为 15 mm×5 mm×400 μm 。将平片硅固定于样品托上，完全浸入磁流变抛光液中，并使待抛光平面平行于电磁铁轴线方向，进行如表 3 所示条件下的抛光研究。图 8 为抛光后 AFM 测试的结果对比。

表 3 平片硅样品抛光条件及结果
Tab.3 Polishing conditions summary of silicon wafer samples

No.	Frequency/Hz	Voltage/V	Peak magnetic flux density/Gs	Polishing time/h	Particle size/ μm	Particle mass concentration/wt%	Roughness/nm
1	5	10	520	1	2.2	5	1.050
2	5	10	520	2	2.2	5	0.909
3	5	10	520	3	2.2	5	0.949
4	5	10	520	4	2.2	5	0.865
5	5	10	520	5	2.2	5	0.871
6	5	10	520	6	2.2	5	0.840
7	5	10	520	8	2.2	5	0.613
8	5	10	520	10	2.2	5	0.566

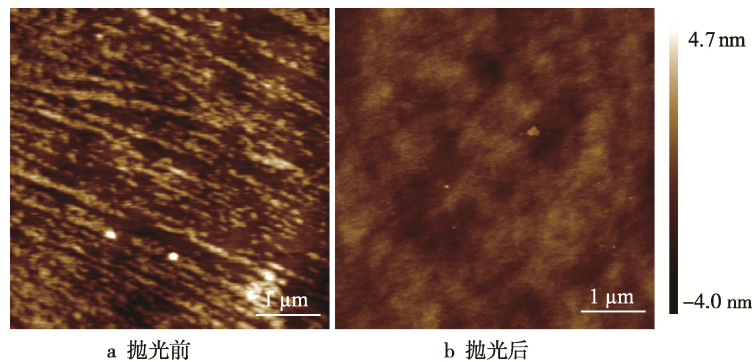


图 8 抛光前后平片硅表面 AFM 扫描图

Fig.8 AFM images of silicon wafers surface: a) before polishing, b) after polishing

由于购买的平片硅表面光洁度较好,首先进行了高磁场长时间的破坏式抛光,得到的硅片粗糙度大约为 1.24 nm,其表面 AFM 扫描图如图 8 所示。然后按表 3 中的条件进行抛光,抛光后,平片硅表面的粗糙度随抛光时间的变化如图 9 所示。总体来看,随着抛光时间的增加,平片硅的粗糙度不断下降,粗糙度最低可达 0.566 nm,比抛光前的 1.24 nm 有一定程度的降低。

基于开阔表面的抛光效果,理论上可以预期对多

孔样品内壁表面有相似的抛光作用。但对于深宽比非常大的微通孔,磁流变液的粘滞性将导致通孔内壁表面的抛光效率下降,并出现通孔中部抛光效率低于孔两侧的现象。对大尺寸通孔的抛光效果仍可以用原子力显微镜给出的表面粗糙度来表征,而对小尺寸微孔的抛光效果,只能利用反射率测试的光学方法来检测。

3 结论

1) 对搭建的深孔内壁抛光装置进行了性能测试与分析,该抛光装置可以产生交变的梯度磁场,且其均匀性良好,满足预期对于深孔内壁抛光的需求。

2) 该抛光方法对具有磁性的材料没有明显效果,可能是材料对磁场的屏蔽效果所致,需进一步配合理论模拟及尝试更多的实验条件加以论证。

3) 在平片硅样品的抛光研究方面发现硅表面粗糙度随抛光时间的变化关系,之后可继续探索粗糙度与磁感应强度、抛光角度、磁流变液中磁颗粒尺寸、抛光粉颗粒尺寸、磁流变液浓度等参数之间的关系,并逐步将其应用于具有深孔结构的非磁性材料的抛光中。

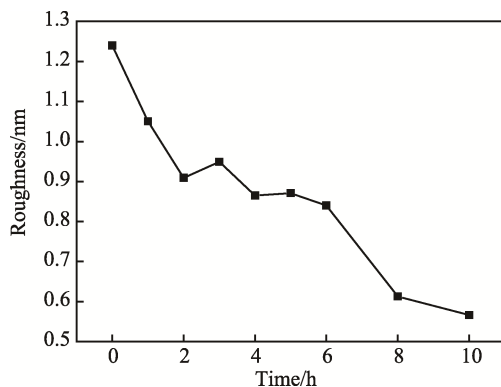


图 9 平片硅样品的粗糙度随抛光时间变化图

Fig.9 Variation of silicon wafer surface roughness with polishing time

参考文献:

- [1] 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 Feng, ZHANG Bin-zhi. Surface Roughness of Optical Elements Fabricated by Magnetic Fluid-assisted Polishing[J]. Optics & Precision Engineering, 2005, 13(1): 34-39.
- [2] 康桂文. 磁流变抛光技术的研究现状及其发展[J]. 机床与液压, 2008, 36(3): 173-175.
KANG Gui-wen. Research and Development of Magnetorheological Finishing[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(3): 173-175.
- [3] 高伟, 魏齐龙, 李晓媛, 等. 磁流变抛光与磁流变液: 原理与研究现状[J]. 磁性材料及器件, 2015(2): 68-73.
GAO Wei, WEI Qi-long, LI Xiao-yuan, et al. Magnetorheological Finishing and Magnetorheological Fluid: Principle and Research Situation[J]. Journal of Magnetic Materials & Devices, 2015(2): 68-73.
- [4] 阳志强, 郭忠达, 张明颂, 等. 磁场强度对磁流变抛光表面粗糙度的影响[J]. 西安工业大学学报, 2007, 27(6): 511-514.
YANG Zhi-qiang, GUO Zhong-da, ZHANG Ming-song, et al. Study on Influence of Magnetic Field Intensity on Surface Roughness in Magnetorheological Finishing[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2007, 27(6): 511-514.
- [5] YAMAGUCHI H, SHINMURA T. Internal Finishing Process for Alumina Ceramic Components by a Magnetic Field Assisted Finishing Process[J]. Precision Engineering, 2004, 28(2): 135-142.
- [6] 程灏波. 流体辅助微纳抛光原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
CHENG Hao-bo. Principle and Technology of Fluid Assisted Polishing[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [7] 彭进, 夏琳, 邹文俊. 化学机械抛光液的发展现状与研究方向[J]. 表面技术, 2012, 41(4): 95-98.
PENG Jin, XIA Lin, ZOU Wen-jun. Research Status and Prospect of Chemical Mechanical Polishing Slurry[J]. Surface Technology, 2012, 41(4): 95-98.
- [8] 陈逢军, 唐宇, 苗想亮, 等. 磨料射流表面抛光研究综述[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 119-127.
CHEN Feng-jun, TANG Yu, MIAO Xiang-liang, et al. Review on the Abrasive Jet Surface Polishing (AJP) Technology[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 119-127.
- [9] 李耀明, 沈兴全, 王爱玲. 磁流变抛光技术的工艺试验[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009, 2009(5): 64-66.
LI Yao-ming, SHEN Xing-quan, WANG Ai-ling. Experiment on Techniques of Magnetorheological Finishing[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009 (5): 64-66.
- [10] RIVEROS R E, YAMAGUCHI H, MITSUISHI I, et al. Progress on the Magnetic Field-assisted Finishing of MEMS Micropore X-ray Optics[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2011, 8147(2): 309-315.
- [11] RIVEROS R E, HANN J N, TAYLOR C R, et al. Nanoscale Surface Modifications by Magnetic Field—Assisted Finishing[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2013, 135(5): 537-544.
- [12] YAMAGUCHI H, RIVEROS R E, MITSUISHI I, et al. Magnetic Field-assisted Finishing for Micropore X-ray Focusing Mirrors Fabricated by Deep Reactive Etching [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 351-354.
- [13] JAIN V K. Magnetic Field Assisted Abrasive Based Micro-/Nano-finishing[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2009, 209(20): 6022-6038.
- [14] GANGULY V, SCHMITZ T, GRAZIANO A, et al. Force Measurement and Analysis for Magnetic Field Assisted Finishing[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2013, 135(4): 041016.
- [15] RIVEROS R E, YAMAGUCHI H, MITSUISHI I, et al. Development of an Alternating Magnetic-field-assisted Finishing Process for Microelectromechanical Systems Micropore X-ray Optics[J]. Applied Optics, 2010, 49(18): 3511-3521.