

光学玻璃磁性复合流体抛光液研究

李文妹 姜 晨 许继鹏 王春华

上海理工大学机械工程学院, 上海 200093

摘要 根据光学玻璃元件超精密抛光加工技术的需求,研究了磁性复合流体(MCF)抛光液成分配比及制备,并在此基础上结合不同抛光工艺参数实验分析 BK7 光学玻璃的抛光质量。研究不同成分配比下的磁性复合抛光头的物理表现,在 MCF 各成分质量分数为铁粉 55%、水 30%、氧化铈 12% 以及 α -纤维素 3% 时,获得形状及稳定性最佳的 MCF 抛光头;采用该比例配制的 MCF 在自行研制的 MCF 抛光设备上对 BK7 玻璃进行定点抛光,对 MCF 抛光头正压力及 BK7 玻璃抛光后的表面粗糙度进行研究。通过实验数据分析发现抛光正压力随主轴转速的增大而增大,随磁铁偏心距的增大而减小,经过 50 min 定点抛光,表面粗糙度从 10.2 nm 降低到 6.7 nm。上述结果表明所制备 MCF 满足光学玻璃超精密抛光加工的需求。

关键词 光学制造; 磁性复合流体; 抛光; 正压力; 表面粗糙度

中图分类号 TQ171.6+8

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.062202

Research for Magnetic Compound Fluid Slurry of Optical Glass

Li Wenmei Jiang Chen Xu Jipeng Wang Chunhua

College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract According to the requirement of ultra-fine finishing of optical glass, composition and preparation of magnetic compound fluid (MCF) slurry are analyzed, and the polishing quality of BK7 optical glass is investigated with the different polishing parameters based on the prepared MCF slurry. Firstly, the physical performances of MCF polishing head in different mass fractions are investigated. A good shaped and stable MCF polishing head composed by iron powder 55% (mass fraction), H_2O 30%, cerium oxide 12% and α -cellulose 3% is obtained. Then, the prepared MCF slurry has been used to spot polish experiment on BK7 optical glass by using a self-designed MCF polishing machine. The normal pressures of MCF polishing head and polished surface roughness have been experimentally investigated. The experimental results show that normal pressure of MCF polishing increases with the increase of spindle speed, and decreases with the increase of magnet eccentricity. And the surface roughness of workpiece has been improved from 10.2 nm to 6.7 nm after 50 min spot-polishing. It indicates that the MCF slurry meets the demand of ultra-fine finishing of optical glass.

Key words optical fabrication; magnetic compound fluid; polishing; normal pressure; surface roughness

OCIS codes 220.4610; 240.5450; 120.5475; 240.5770

1 引 言

光学玻璃元件是各类高精光电系统不可或缺的关键组件,军用方面如激光器、热成像等装置的透镜、飞行器的光学头罩等;其在医疗和民用光电仪器中也被广泛应用,如眼球内置镜、数码相机、光盘读写装置、高品质投影仪等^[1]。但光学玻璃元件的超精密制造仍然存在一些技术问题,难以完全抑制光学元件制造过

收稿日期: 2016-01-04; **收到修改稿日期:** 2016-01-20; **网络出版日期:** 2016-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(51475310)、高等学校博士学科点专项科研基金(20133120120005)、上海市科学技术委员会资助项目(13ZR1428000)

作者简介: 李文妹(1992—),女,硕士研究生,主要从事光学元件抛光及检测方面的研究。E-mail: lee_wenmei@163.com

导师简介: 姜 晨(1978—),男,博士,副教授,主要从事光学元件超精密加工及检测方面的研究。

E-mail: jc_bati@163.com (通信联系人)

程中产生的亚表面损伤,不可避免地会在光学表面残留加工痕迹产生的中频误差等缺陷^[2]。磁性复合流体(MCF)抛光是一种新型纳米级超精密加工技术^[3],在可控磁场的作用下流体黏度可保持连续、无级变化,能够实现可控、确定性加工^[4],特别是对于制造过程中尺寸难以估计的中频误差,MCF抛光头尺寸可控可变的优势使得其特别适合用于光学非球面元件的中频误差修正抛光。

20世纪80年代初期 Tain 和 Kawata 利用磁场辅助抛光对聚丙烯平片进行加工,工件表面粗糙度降低了10倍^[5]。Suzuki 等^[6]用柔性的橡胶垫和聚氨酯将铜盘盘槽内的磁性液体密封,抛光后工件粗糙度从15 nm降到1 nm(均方根值是1.7 nm)。20世纪90年代初,Kordonski 将电磁学、流体动力学理论、分析化学结合于光学加工中,发明了磁流变抛光(MRF)技术^[7]。含有纳米级磁性颗粒的磁性流体(MF)具有较高的流变性和较强的抗沉淀稳定性,但是由于纳米级磁性粒子的饱和磁化强度过低,只能产生较小的剪切屈服应力,加工效率低,因此不利于抛光;而含有微米级磁性颗粒的磁流变液,磁性粒子的饱和磁化强度大,但是流变性和抗沉淀稳定性较差^[8]。2002年,Shimada 等^[9]在MRF的基础上结合这2种磁性粒子的优点,将含有微米级磁性颗粒的磁流变液和纳米级磁性颗粒的磁性流体混合在一起,研制出MCF。MCF抛光具有MRF抛光几乎对光学镜面不造成亚表面损伤和形变的优点^[10],又克服了其流变性和抗沉淀稳定性差的缺点。吴勇波等^[11]利用MCF对硬度较高的化学蒸汽沉积(CVD) SiC材料的光学镜片进行抛光,获得粗糙度低于2 nm的表面。MCF抛光在提高抛光精度、抛光稳定性和抛光效率上有一定的优势,是具有良好应用前景的新型抛光技术,在光学元件制造领域具有巨大的应用潜力。MCF抛光液的制备是MCF抛光的核心技术之一,很大程度地决定着抛光过程的材料去除和抛光质量,本文重点研究了MCF抛光液的成分配比及制备,并利用BK7光学玻璃对制备的抛光液进行了实验研究,获得不同抛光参数下的抛光效果,为能够实现光学玻璃元件MCF抛光技术提供指导与依据。

2 磁性复合流体抛光原理

MCF由微米级和纳米级的磁性微粒、基液、磨粒及植物纤维素4种成分组成^[11]。图1为磁性微粒在外磁场作用下的链化过程示意图。无外磁场时粒子呈无序分布状态^[12];当施加外磁场后,磁性微粒受磁场力作用,磁偶极矩方向逐渐与外磁场方向相同,所有磁性微粒形成的磁偶极子沿磁力线方向排列,使磁性微粒从无序状态向定向的有序状态变化,最终互相连接形成链状结构;随外磁场强度的增加,这种链状结构进一步发生聚集,形成柱状或复杂的团簇状结构^[13];当撤去外加磁场时,磁性微粒又迅速恢复原来的无序分布状态。

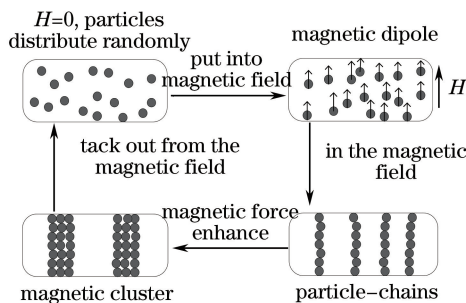


图1 磁性微粒链化过程

Fig. 1 Chain process of magnetic particles

图2是MCF抛光原理示意图。如图2所示,一圆柱状永磁铁,以一定偏心距 e 被固定在转盘下,转盘安装在主轴下端。磁铁下方距离 δ 处固定有用于附着抛光液的载液板。在磁铁随转盘旋转的条件下,用引流装置将一定质量的抛光液附着到载液板上,抛光液内部的磁性微粒沿磁力线形成磁性簇。磁性簇的形状和尺寸取决于抛光液的成分、磁场强度和磁铁偏心距。磨粒分布于磁性簇的内部或间隙内,植物纤维穿插于磁性簇间隙,有利于增加MCF的黏度。受磁性浮力及重力影响,多数磨粒聚集在磁性簇尖端。主轴旋转,带动磁铁绕转盘中心轴旋转,磁场强度不变,磁力线方向则随着磁铁位置的改变呈周期性变化,产生空间动态磁场,赋予磁性簇空间钟摆运动^[11],混合在磁性簇中的磨粒因此变得活泼,活泼的磨粒与工件之间产生相对运动,从而发挥微小切削作用,实现材料去除。

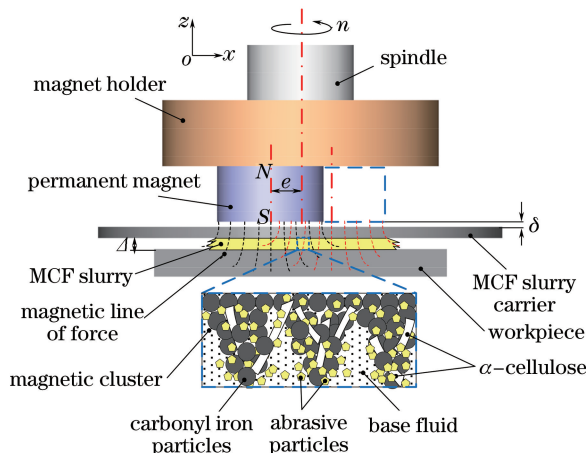


图 2 MCF 抛光原理示意图

Fig. 2 Schematic illustration of polishing principle using MCF

3 MCF 的配制

MCF 的配制比例是影响抛光效果的一个重要因素。为了获得稳定性好、适合抛光的 MCF, 本实验共准备了 6 种不同质量分数混合比例的水基 MCF (见表 1), 其具体成分是以水为基液、铁粉、氧化铈抛光粉、 α -纤维素, 其中铁粉包含微米级羰基铁粉和纳米级四氧化三铁各一半。按表 1 中 MCF 各组分的质量分数将铁粉、氧化铈、 α -纤维素、水依次注入放置在天平上的容器内, 然后通过搅拌使各种成分均匀混合在一起, 并观察抛光液的流动性。静置 30 min, 观察抛光液的沉降情况。最后, 利用引流装置将配置好的抛光液附着到载液板上, 观察抛光液在载液板上的形状及其稳定性。实验中 M1、M2 和 M6 研究 α -纤维素对 MCF 粘稠度的影响; M3~M6 研究铁粉和水的比例对抛光液稳定性和抛光头成形的影响。

表 1 实验中 MCF 成分比例

Table 1 Composition of MCF slurries used in the experiment

No.	Composition			
	IP * /% (mass fraction)	CO * /% (mass fraction)	Water /% (mass fraction)	α -cellulose /% (mass fraction)
M1	58	12	30	0
M2	52	12	30	6
M3	58	12	27	3
M4	50	12	35	3
M5	52	12	33	3
M6	55	12	30	3

* IP: iron powder; * CO: cerium oxide

4 使用 MCF 对 BK7 抛光

BK7 玻璃是一种常用于可见光和近红外光元件制造的光学材料, 具有高硬度、抗划伤的特点, 因此对抛光介质有较高的要求。根据对 MCF 配制比例的研究结果, 采用质量分数比例为铁粉 55%、氧化铈 12%、水 30%、 α -纤维素 3%, 每组实验所使用的 MCF 的质量相等。采用表 2 的加工工艺参数在图 3 所示自主研发的数控抛光机床上对 BK7 玻璃进行抛光, 并利用测力仪 (KISTLER Type 9257B) 在线检测抛光正压力, 定点抛光一定时间后利用轮廓仪 (Taylor Hobson Form Talysurf PGI 200b) 对抛光后的表面进行检测。

表 2 抛光工艺参数
Table 2 Experimental parameters of polishing

Machining parameter	Value
Spindle rotating speed n / (r/m)	600, 900, 1200, 1500
Magnet eccentricity e / mm	2, 6, 10, 14
Working gap Δ / mm	0.75, 2
Polishing time t / min	10, 30, 50, 70
Workpiece / (mm \times mm \times mm)	55 \times 55 \times 8
Magnet diameter d / mm	20

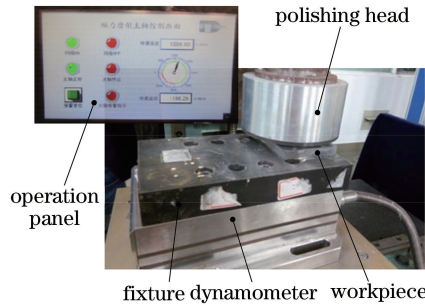


图 3 抛光实验装置

Fig. 3 Experimental equipment of polishing

5 实验结果对比及分析

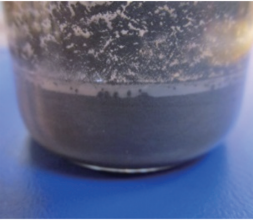
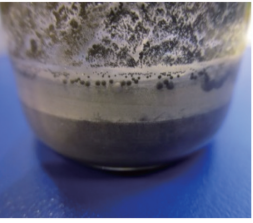










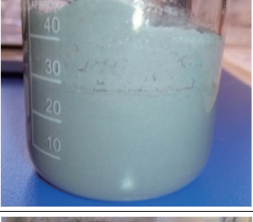
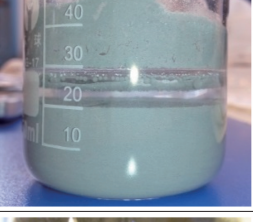

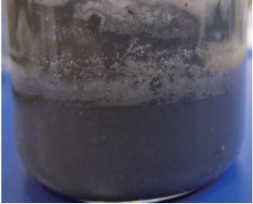
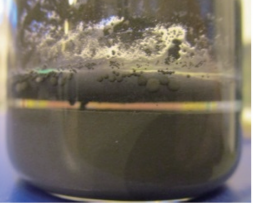

根据 MCF 抛光原理,要求抛光液在载液板上形成的抛光头形状稳定,并具有一定的流动性和黏度,使得没有磁性但发挥主要抛光作用的磨粒在主轴旋转过程中因重力作用自然聚集于磁性簇尖端,同时抛光液又不会掉落。表 3 是实验中配制的抛光液静置前后和抛光头形状对比的照片。

实验观察结果:M1 抛光头形状较好,但在抛光液加载到载液板上的过程中氧化铈从抛光液中分离留在了装抛光液的容器内,导致抛光头上几乎没有抛光粉;M2 抛光液流动性差,静置 30 min 后基本无变化,加载到载液板上抛光头无法成形;M3 抛光液流动性差,主轴旋转过程中抛光液不发生钟摆运动;M4 抛光液流动性强,抛光头形状不稳定,加载到载液板上后抛光粉聚集于抛光头下端,在主轴旋转过程中处于下端的抛光液掉落到抛光台上;M5 抛光液流动性强,抛光头形状不稳定,抛光粉聚集于抛光头下端,当主轴旋转时抛光头上的抛光液四处飞溅;M6 抛光液流动性好,抛光头形状稳定,抛光粉在主轴旋转过程中聚集于磁性簇尖端,并能够稳定依附在磁性簇上,符合抛光要求。

从表 3 可以看到大部分抛光液静置后基本分为上下两层,上层边缘漂浮的是气泡包裹的极少量铁粉等物质,下层灰黑色物质是铁粉。一般情况下,稳定性好的 MCF 中磁性微粒较为均匀地分散在基载液中,非磁性抛光粉是后加到 MCF 中去的,经过一定的搅拌,抛光粉也均匀地分散在基载液中。由于铁粉不溶于水且密度大于水,因此静置一段时间后出现沉淀是正常现象。M1 没有加入 α -纤维素,静置 30 min 后上层液体浑浊,因抛光粉的密度小于磁性微粒密度,且无稳定剂与抛光粉结合,所以经过一段较长时间的放置,抛光粉会与磁性微粒分离并悬浮于基液中。而除了黏度最大的 M2,其他加了 α -纤维素的抛光液静置 30 min 后上层的清澈液体是水,说明 α -纤维素将氧化铈和铁粉结合在一起使之沉淀。通过 M1、M2、M6 三组实验对比发现, α -纤维素确实具有增加抛光液黏度的作用,能够使氧化铈黏附于磁性簇表面。通过 M3~M6 四组实验调整铁粉和水在抛光液中的含量,最终 M6 被确定为获得抛光头形状、稳定性都较好,可用于 MCF 抛光液的配制。

表3 MCF抛光液配制实验结果

Table 3 Experimental results of MCF slurry

No.	$t=0$ min	$t=30$ min	Shape of MCF polishing head
M1			
M2			
M3			
M4			
M5			
M6			

6 加工实验结果与分析

6.1 抛光正压力

利用测力仪检测 BK7 玻璃在不同抛光工艺参数(见表 2)下抛光所受到的正压力变化情况如图 4 所示。如图 4 (a)所示,在其他抛光参数不变的情况下,磁铁偏心距增大抛光正压力随之降低。这是由于随偏心距的增大,主轴旋转过程中形成的磁场分布范围变大,相同质量的磁性复合流体的分布面积变大,磁性簇变短,磁性复合流体对工件的挤压力变小,抛光正压力随之减小。如图 4 (b)所示,在 2 个不同偏心距情况下,各自的抛光正压力都随主轴转速的增大而增大,说明抛光正压力与主轴转速存在正相关关系。实验结果表明磁

铁偏心距增大抛光正压力随之降低,反之正压力增大;抛光正压力与主轴转速成正相关。

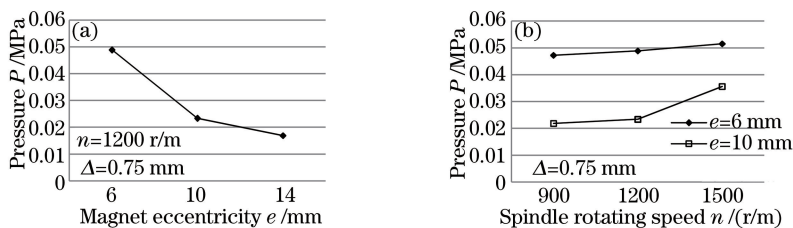


图4 受(a) 磁铁偏心距 e ; (b) 主轴转速 n 影响的抛光正压力

Fig. 4 Polishing normal pressure with effect of (a) magnet eccentricity e ; (b) spindle rotating speed n

6.2 表面粗糙度

利用轮廓仪检测 BK7 光学玻璃在不同抛光工艺参数下定点抛光一定时间后的表面粗糙度 R_a , 实验结果如图 5 所示。图 5 (a)、(b)、(c) 给出了抛光后表面粗糙度随磁铁偏心距、主轴转速和驻留时间的变化情况。图 5 (d)、(e) 给出了抛光前后试件表面粗糙度曲线, 抛光前试件表面粗糙度 R_a 在 9.2~10.2 nm 之间, 经过 50 min 的抛光后, 最佳表面粗糙度达到了 6.7 nm。

从图 5 (a) 可以看到磁铁偏心距为 6 mm 时表面粗糙度值最小, 磁铁偏心距为 2 mm 时粗糙度最大, 这是由于虽然磁铁偏心距越小抛光液越集中, 抛光正压力越大, 而实验所使用的抛光方法的材料去除主要依靠磨粒对工件表面的刮擦^[3], 当抛光液堆积时磁性簇摆动困难对材料的去除能力被削弱, 因此短时间内获得的表面粗糙度改善效果不明显。从图 5 (b) 可见主轴转速越高表面粗糙度越大, 由上述抛光正压力的分析可知, 随着主轴转速的提高, 正压力随之增大。根据 Preston 方程, 材料的去除率可表示为^[14]:

$$R = KP V, \quad (1)$$

式中, K 为 Preston 系数, P 为正压力, V 为相对速度。由于抛光头不同位置的磁性簇相对运动速度不同, 使得定点抛光的试件表面材料去除量不均匀, 主轴转速越大, 从抛光头中心到外围的磁性簇的相对速度差异随之增大, 材料去除不均匀性增强, 从而获得的表面粗糙度值增大。

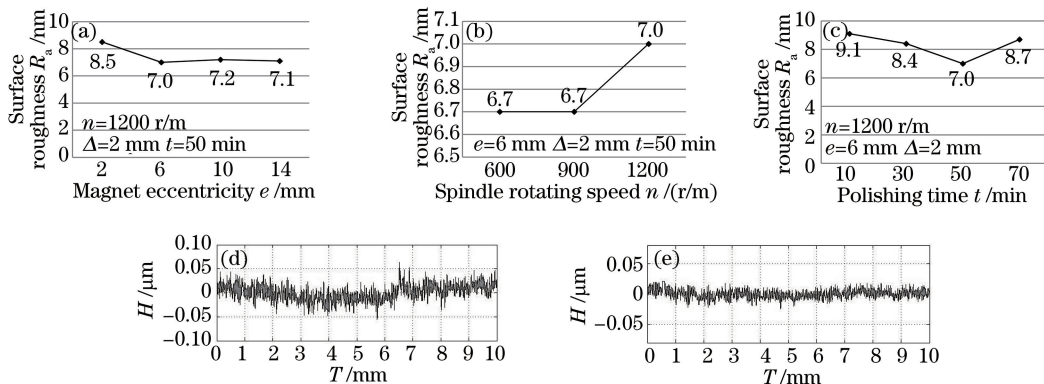


图5 MCF 抛光实验表面粗糙度结果。(a) 磁铁偏心距 e ; (b) 主轴转速 n ; (c) 驻留时间 t ; (d) 抛光前, $R_a=10.2$ nm; (e) 抛光后, $R_a=6.7$ nm

Fig. 5 Surface roughness of MCF polishing. (a) Magnetic eccentricity e ; (b) spindle rotating speed n ; (c) polishing time t ; (d) before polishing, $R_a=10.2$ nm; (e) after polishing, $R_a=6.7$ nm

如图 5 (c) 所示, 开始时, 随着抛光时间的增加, 表面粗糙度值随之降低, 当抛光时间到达 50 min 时试件表面粗糙度达到最小值, 延长抛光时间试件的表面粗糙度变大。由上述抛光液沉淀和稳定性测试结果可以知道, 在长时间放置的情况下铁粉会发生沉淀, 尽管抛光过程中磁场对抛光液有防止沉淀作用, 但抛光头中间磁力线较密集, 且由于重力的作用, 抛光液向抛光头中间聚集, 同时抛光头与试件之间的间隙非常小 ($\Delta=2$ mm), 有一定的挤压作用, 经过长时间的抛光驻留, 处于抛光头中间的抛光液有可能附着在试件上。在实验过程中也观察到抛光 70 min 后将抛光头移开试件时, 处于中间的抛光液留在了试件表面。可以推测经过

一段较长时间的驻留,处于抛光头中间的抛光液被挤压在试件上不再受磁场的作用,处于相对静止状态,只有处于外部的抛光液仍处于活动状态,能够实现材料的去除,使得加工区域的材料去除不均匀,导致表面粗糙度增大。因此过长时间的定点驻留反而增大试件的表面粗糙度,50 min 左右为最佳驻留时间。实验表明,MCF 抛光磁铁偏心距、主轴转速和驻留时间都存在最佳工艺参数值。

7 结 论

对光学玻璃磁性复合流体抛光液进行了初步探索,通过配制不同比例的抛光液,综合对比流动性、沉降性、稳定性及抛光头的形状,得到最适合磁性复合流体抛光的抛光液质量分数比例:铁粉 55%、氧化铈 12%、水 30%以及 α -纤维素 3%。并在此基础上对 BK7 玻璃抛光,对实验结果的数据进行分析表明:抛光正压力随磁铁偏心距增大而降低,随主轴转速的提高而增大;试件的表面粗糙度均能在抛光 10 min 内达到 9.1 nm 以下;当抛光工艺参数为磁铁偏心距 6 mm,主轴转速 900 r/m,抛光驻留时间 50 min 时,定点抛光效果($R = 6.7$ nm),可以满足基本抛光要求。下一步将重点研究抛光粉对磁性复合流体抛光液的性能影响,在进一步改善表面粗糙度的同时,获得高效的磁性复合流体抛光去除率,从而为实现高效、高质量光学玻璃元件超精密磁性复合流体抛光技术奠定研究基础。

参 考 文 献

- Zhang Xiaobing. Review on manufacture and measurement method of aspheric surface part[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 2(37): 106-111.
张小兵. 非球面光学元件加工及检测技术综述[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 2(37): 106-111.
- Zeng Xuefeng, Zhang Xuejun. Impact of mid-spatial frequency errors in optical manufacturing on modulation transfer function[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 072202.
曾雪锋, 张学军. 光学制造中频残差对光学调制传递函数的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 072202.
- Guo H R, Wu Y B, Lu D, *et al.*. Effects of pressure and shear stress on material removal rate in ultra-fine polishing of optical glass with magnetic compound fluid slurry[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2759-2769.
- Bai Yang, Zhang Feng, Deng Weijie, *et al.*. Preparation of magnetorheological polishing fluid and its polishing stability [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0416001.
白 杨, 张 峰, 邓伟杰, 等. 磁流变抛光液的配制及其抛光稳定性[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0416001.
- Zhang Feng, Yu Jingchi, Zhang Xuejun, *et al.*. Magnetorheological finishing technology [J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(5): 1-8.
张 峰, 余景池, 张学军, 等. 磁流变抛光技术[J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 1-8.
- Suzuki K, Takeuchi K, Uematsu T, *et al.*. A new dressing method for superabrasive wheels utilizing magnetic abrasive polishing[J]. Iner J Jap Soc Prec Eng, 1999, 33(1): 27-31.
- Zhang Feng. Research progress of magnetorheological finishing technology at CIOMP [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 092202.
张峰. 磁流变抛光技术在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 092202.
- Xu Zhiqiang. Study on key technology of inclined magnetorheological polishing for micro aspherical surface[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
徐志强. 小口径非球面斜轴磁流变抛光关键技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- Shimada K, Wu Y B, Wang Y C. Effect of magnetic cluster and magnetic field on polishing using magnetic compound fluid (MCF)[J]. Journal of magnetism and Magnetic Materials, 2003, 262: 242-247.
- Bai Yang, Zhang Feng, Li Longxiang, *et al.*. Manufacture of silicon modification layer on silicon carbide surface by magnetorheological finishing[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0322007.
白 杨, 张 峰, 李龙响, 等. 碳化硅基底改性硅表面的磁流变抛光[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0322007.
- Wu Y B, Wang Y L, Fujimoto M, *et al.*. Nano-precision polishing of CVD SiC using MCF (Magnetic compound fluid)

- slurry[J]. Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 2014, 23(6): 547-554.
- 12 Wang Xuyue, Wu Yongbo, Jiang Jian, *et al.*. MPT development and polishing characteristic test[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(6): 832-836.
王续跃, 吴勇波, 姜 健, 等. 磁性复合抛光体配制及其抛光性能试验研究[J]. 大连理工学报, 2006, 46(6): 832-836.
- 13 Yang Shiqing, Zhang Wanli, Gong Jie, *et al.*. Rheology of magnetorheological fluid[J]. Functional Materials, 1998, 29(5): 550-552.
杨仕清, 张万里, 龚 捷, 等. 磁流变液的流变学性质研究[J]. 功能材料, 1998, 29(5): 550-552.
- 14 Zhang Feng, Zhang Xuejun, Yu Jingchi, *et al.*. Foundation of mathematics model of magnetorheological finishing[J]. Optical Technique, 2000, 26(2): 190-192.
张 峰, 张学军, 余景池, 等. 磁流变抛光数学模型的建立[J]. 光学技术, 2000, 26(2): 190-192.