

光学元件磁性复合流体抛光特性研究

叶 卉, 李晓峰, 段朋云, 焦德礼, 艾今朝, 罗 辉, 姜 晨

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 采用磁性复合流体 (MCF) 对 BK7 玻璃进行定点抛光实验, 对抛光斑进行三维模型重构, 并对磁场空间分布进行仿真与实验分析, 阐明抛光材料去除机理, 确定材料去除率、表面粗糙度及硬度随抛光时间的变化规律, 建立了材料去除量与磁通密度的关系曲线。实验结果表明: 抛光形成的抛光斑表面轮廓为蝶形, 其沿抛光轮轴向的截面轮廓呈“W”形; 材料去除量与磁场强弱及抛光时间密切相关, 抛光深度去除率最高可达 553 nm/min; 表面粗糙度随抛光时间的增加先上升后下降, MCF 抛光可获得表面粗糙度 $Ra < 6$ nm 的光滑表面, 且粗糙度与硬度呈现一定的正相关关系。

关键词: 磁性复合流体抛光; 磁场分布; 材料去除率; 粗糙度; 硬度

中图分类号: TH 145 **文献标志码:** A

Magnetic compound fluid polishing characteristics of optical elements

YE Hui, LI Xiaofeng, DUAN Pengyun, JIAO Deli, AI Jinzhao, LUO Hui, JIANG Chen

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The fixed-point polishing experiment of BK7 glass was carried out by using magnetic compound fluid (MCF). By building the three-dimensional model of polishing spot and simulating the spatial distribution of magnetic field, the material removal mechanism of MCF polishing was explained, and the variation of material removal rate, surface roughness and hardness with polishing time was determined. The relationship between material removal depth and magnetic flux density was established. The experimental results show that the surface profile of the polishing spot is "butterfly" shape and the cross-section profile along the axial direction of the polishing wheel is "W" shape. The material removal rate is closely related to magnetic field and polishing time, and the highest removal rate about polishing depth is 553 nm/min. The surface roughness first increases and then decreases with the increase of polishing time. The smooth surface with Ra roughness less than 6 nm can be produced by MCF polishing, and there is a positive correlation between roughness and hardness.

Keywords: magnetic compound fluid polishing ; magnetic field distribution; material removal rate; roughness; hardness

收稿日期: 2021-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51475310); 上海市青年扬帆科技英才计划项目 (18YF1417700); 上海理工大学教师教学发展研究项目 (CFTD212007); 上海理工大学 2020 年第一批科研项目课程

第一作者: 叶 卉 (1989-), 女, 讲师。研究方向: 精密加工与材料激光损伤性能优化。E-mail: yehui513@usst.edu.cn

以 BK7 玻璃和熔石英玻璃为代表的光学元件是高精度光学系统中不可缺少的重要组件, 被广泛应用于高功率激光聚变装置、红外热成像系统、天空望远镜、卫星等^[1-2]。光学元件的超精密加工过程包括磨削、研磨和抛光工序, 其最终表面质量和光学特性直接影响了光学系统的寿命和稳定性。传统抛光在抛光磨粒对玻璃材料挤压、划擦、去除的过程中, 容易在元件表面/亚表面残留划痕、微裂纹等机械缺陷, 严重影响最终的加工质量^[3]。

磁性复合流体(magnetic compound fluid, MCF)抛光是一种适用于高精度光学加工的新型微纳加工技术。磁性复合流体的概念最早由日本的 Shimada 等^[4]提出, MCF 是由磁流变液(magnetorheological fluid, MRF)和磁流体(magnetic fluid, MF)两种流体混合而成的磁介质, 主要包含磁性颗粒、非磁性磨粒、植物纤维素及基液, 其中磁性颗粒主要为微纳米级铁磁微粒^[5]。MCF 结合了 MRF 和 MF 两种材料的优点, 能够在永磁场的作用下, 形成粒子分布稳定、具有黏稠性的 Bingham 流体抛光头, 同时产生较大的磁场作用力, 实现材料剪切去除。MCF 黏度可保持连续、无级变化, 能够实现可控、高效的高精度加工^[6], 对元件表面及亚表面几乎无损伤, 因此, 在超精密加工领域有广阔的应用前景^[7-8]。国内外研究者对 MCF 抛光展开了丰富的研究, Guo 等^[9]研究了立式 MCF 抛光过程中磁铁转速、载液盘转速及抛光间隙对材料去除率的影响, 并建立了包含抛光正应力和剪应力的材料去除模型; 焦黎等^[10]针对卧式 MCF 抛光中空间磁场分布对熔石英玻璃材料去除特性的影响进行研究, 结果表明, 材料去除率与磁场强度呈正相关, 且采用 NS-SN 磁极分布方式有利于获得理想的材料去除效率; 林龙侨等^[11]研究了 MCF 抛光

过程在不同的主轴转速、加工间隙、抛光时间和抛光路径条件下, 微结构材料去除特性以及保形情况变化规律, 确定了理想的抛光工艺参数; 姜晨等^[12]研究了 MCF 抛光液中添加不同质量分数的高分子类分散剂聚乙烯醇(PVA)后 BK7 玻璃抛光特性的变化规律, 研究结果表明, 当 PVA 质量分数为 5% 时, 能够实现最大的材料去除效率 26.4×10^{-4} g/min, 并获得粗糙度低于 10 nm 的光洁玻璃表面。上述研究有效推动了 MCF 抛光在光学制造领域的应用, 也推动了磁性辅助加工技术的迅速发展。

为了获得良好的光学表面粗糙度并实现理想的材料去除效率, 本文以 BK7 玻璃为加工对象, 结合实验和理论分析, 研究磁性复合流体抛光时间对 MCF 抛光特性, 如抛光深度、抛光斑空间几何形貌、表面粗糙度和硬度的影响规律, 揭示抛光材料去除机理及表面形貌演变规律, 以期对工程应用中抛光液驻留时间和抛光运动轨迹规划提供有益指导。

1 实 验

1.1 磁力辅助抛光原理与设备

本实验使用自主搭建的卧式抛光机床, 其结构如图 1 所示。水平主轴驱动一环形永磁铁以 n_t 的转速回转, 形成空间动态磁场。环形磁铁左右两侧各安装一定厚度的环形挡板, 两片环形挡板和中间环形磁铁共同构成抛光轮。工件置于磁铁下方, 与抛光轮之间存在抛光间隙 δ 。其中, 永磁铁为剩余磁通密度 0.4 T 的钕铁硼(Nd-Fe-B)环形磁铁, 挡板材料为聚乳酸树脂(PLA), 磁铁和挡板具有相同的外径(40 mm)和内径(25 mm), 厚度分别为 8 mm 和 4 mm。抛光轮转速 n_t 为 300 r/min, 抛光间隙 δ 为 1.5 mm, 相关参数见表 1。

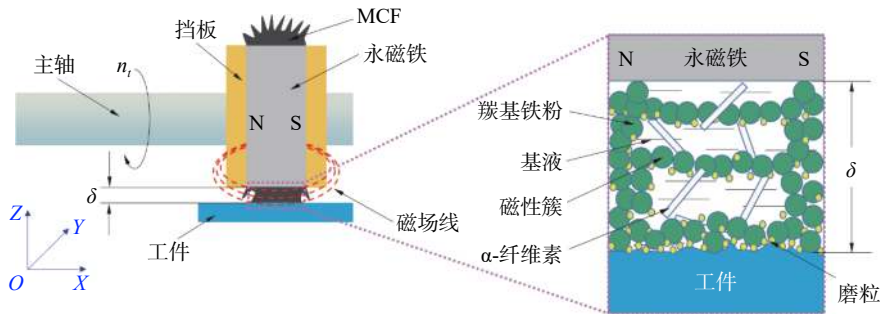


图 1 MCF 抛光装置结构及原理图

Fig.1 Device structure and schematic diagram of MCF polishing

表 1 实验参数
Tab.1 Experimental parameters

抛光参数	数值
工件材料	BK7玻璃
抛光轮转速 $n_r/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	300
抛光间隙 δ/mm	1.5
磁通密度 B/T	0.4
磁铁外径(mm)/内径(mm)/宽(mm)	40/25/8
挡板外径(mm)/内径(mm)/宽(mm)	40/25/4

实验所用 MCF 抛光液是由磁性颗粒(主要成分为 45 μm 羰基铁粉)、非磁性磨粒(1.6 μm 氧化铈)、 α -纤维素和去离子水按照 10 : 2 : 1 : 7 的质量比例配制而成。在无磁场状态下, MCF 为液态, 此时其内部粒子呈无序分布状态; 将 MCF 引入永磁铁表面后, MCF 内部的磁性粒子将在磁场力的作用下沿着闭合的磁力线形成链状结构甚至聚集成磁性簇, 形成具有黏稠性的半固态 Bingham 流体抛光头, 如图 1 所示。因磁悬浮力和重力的双重作用, 大量非磁性磨粒将会被挤压到磁场强度较弱的位置, 即移动到 MCF 抛光头下方。在动态磁场作用下, 磁性簇作空间回转运动, MCF 抛光头下方的磨粒与工件发生接触、相对运动和微切削作用, 通过流体动压剪切实现工件表面的材料去除。

1.2 样品制备

本研究以 20 mm×20 mm×10 mm 的 BK7 元件为加工对象, 元件首先经 0.5 μm 氧化铈化学机械抛光预处理, 表面光洁, 无明显划痕、凹坑等缺陷。MCF 抛光前, 将元件置于抛光轮正下方工作台上, 调节抛光轮 Z 向位置到距工件表面合适的高度 ($\delta=1.5\text{ mm}$), 用微量滴管向环形磁铁圆面均匀滴入 3~5 g 抛光液对元件进行定点抛光, 抛光过程中每隔 15 min 向抛光轮补充约 1~3 g 抛光液。元件表面均分为 4 个区域: I, II, III 和 IV, 各区域分别对应抛光时间 $t=10, 30, 60, 90\text{ min}$, 抛光完成后对各抛光斑进行轮廓、粗糙度及硬度测试。

1.3 表面轮廓、粗糙度及硬度测试

使用 Taylor Surf i200 表面轮廓仪对 MCF 抛光斑进行轮廓检测, 利用接触探针沿抛光斑平行于抛光轮轴向(图 1: X 向)和垂直于抛光轮轴向(图 1: Y 向)两个方向进行采样测试, 确保探针完整地经过抛光斑, 从而获取抛光截面轮廓。两个方向均采集两条以上轮廓数据。抛光表面粗糙度评价利

用 Taylor Surf i200 粗糙度测试探针, 在各抛光斑内测 3~6 段数据, 并将其平均值定义为该抛光斑的粗糙度结果。利用 HV-1000 显微维氏硬度计对抛光表面进行硬度测试, 以 0.25 N 载荷在各抛光斑底部印压 3~5 个维氏压痕, 取其测量结果平均值作为该抛光斑的硬度数值。

2 实验结果

2.1 材料去除率

图 2 为 BK7 表面区域 III 和区域 IV 分别经 60 min 和 90 min MCF 抛光后的表面形貌。抛光斑表面沿 X 向呈现左右基本对称的“蝶形”轮廓, 中间窄、两边宽, 且抛光时间越长, 抛光斑轮廓越大。90 min 抛光斑下方出现一微小尖峰(蓝圈所示), 这一尖峰在其他抛光斑中未出现。

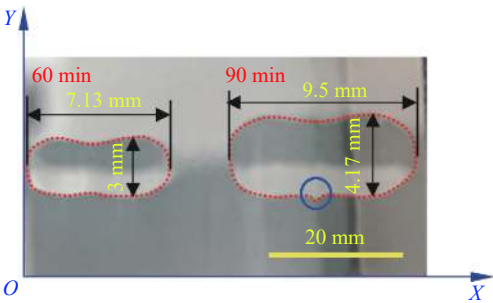


图 2 抛光斑表面形貌
Fig.2 Surface morphology of polishing-induced spots

使用表面轮廓仪沿抛光斑 X 向和 Y 向进行表面轮廓检测, 抛光斑尺寸如表 2 所示。图 3 所示为抛光斑截面轮廓, 沿平行于抛光轮轴向的 X 方向上, 抛光斑截面轮廓呈“W”形(图 3(a)), 中间位置材料去除量最少; 沿垂直于抛光轮轴向的 Y 方向上, 抛光斑截面轮廓呈抛物线形(图 3(b))。随抛光时间的延长, 抛光深度不断加深, 最大深度 MR_{dmax} 从 10 min 的 1.71 μm 提升至 90 min 的 42.96 μm , 且最大抛光深度所在位置随抛光时间增加逐渐向抛光轮两侧移动。此外, 抛光斑 X 向(长度)和 Y 向(宽度)最大开口尺寸分别从 10 min 的 2.8, 1.5 mm 提升至 90 min 的 9.5, 4.17 mm。同时, 在 90 min 抛光斑的 X 方向中间位置, 存在一个材料去除凸峰(图 3(a)蓝色圈所示), 这一现象在其他抛光斑中均未出现, 初步分析是由于本实验采用定时定量补充 MCF 抛光液的方式, 随着抛光时间延长, 抛光液中水分的逐步蒸发使得抛光头局部形状改变所致^[13]。图 2 中 90 min 抛光斑下

表 2 实验结果
Tab.2 Experimental results

抛光时间 t/min	最大深度 $MR_{\text{dmax}}/\mu\text{m}$	X向尺寸/mm	Y向尺寸/mm	去除体积 MR_v/mm^3	粗糙度 Ra/nm	粗糙度 Rz/nm	硬度
0	0	0	0	0	3.733 3	25.533 3	—
10	1.71	2.80	1.50	2.76×10^{-6}	8.566 7	47.400 0	793.4
30	16.61	6.57	2.00	8.31×10^{-4}	15.800 0	63.000 0	909.4
60	25.30	7.13	3.00	2.85×10^{-3}	5.866 7	34.700 0	736.3
90	42.96	9.50	4.17	1.72×10^{-2}	9.566 7	49.566 7	848.4

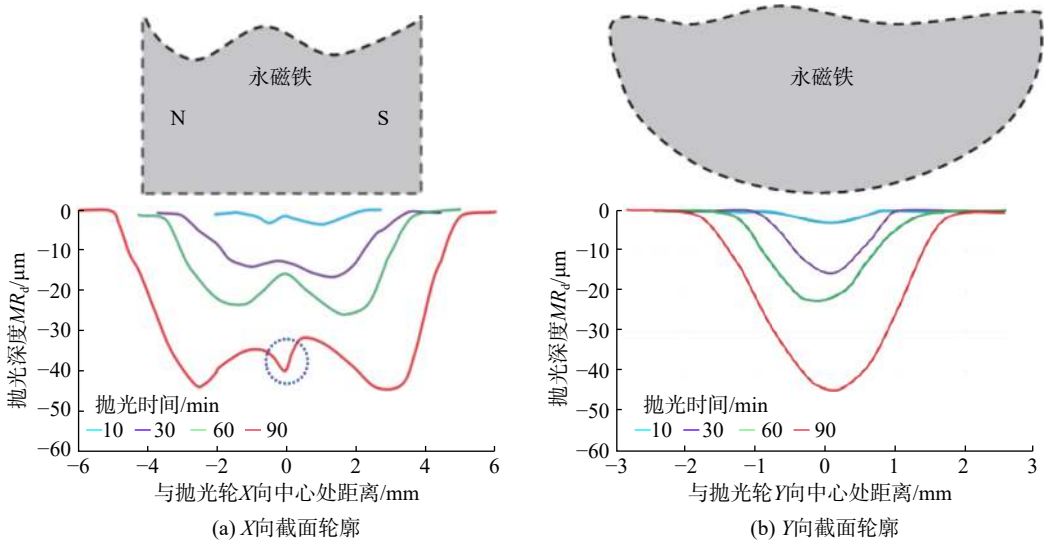


图 3 抛光截面轮廓随时间变化

Fig.3 Section profiles of polishing-induced spots

方的小尖峰与该处材料去除凸峰有关。由此可知,过长的抛光时间将会影响 MCF 的分布,不利于 MCF 抛光的稳定。

利用抛光斑 X 向与 Y 向截面轮廓,结合仿真软件进行抛光斑三维模型重构与体积分析。60 min 抛光斑三维几何形态如图 4 所示,计算可得材料去除体积为 $2.85\times 10^{-3}\text{ mm}^3$ 。用同样的方法可计算出其余 3 个抛光斑的体积去除量 MR_v ,分别为 $2.76\times 10^{-6}\text{ mm}^3$ (10 min)、 $8.31\times 10^{-4}\text{ mm}^3$ (30 min)和 $1.72\times 10^{-2}\text{ mm}^3$ (90 min),结果见表 2。90 min 相比于 10 min 抛光时间的材料去除体积提升了 4 个量级。

图 5 所示为不同抛光时间所对应的材料最大深度去除效率 MRR_{dmax} ,即抛光最大深度 MR_{dmax} 与抛光时间 t 的比值 $MRR_{\text{dmax}}=MR_{\text{dmax}}/t$ 。抛光 30 min 时 MRR_{dmax} 最大,可达 533 nm/min。随着抛光时间的增加,材料去除效率有所下降,但依然保持在 420 nm/min 以上。长时间抛光不利于材料去除率的提升,因此,MCF 在元件表面驻留时间不宜过长。此外,图 5 表明,相比于光学制造应用最广泛的

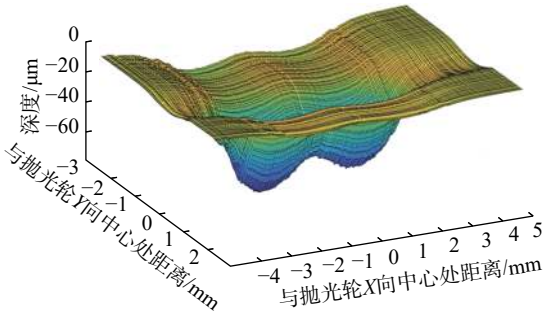


图 4 60 min 抛光斑三维模型重构

Fig. 4 Three-dimensional model reconstruction for 60 min polishing spot

化学机械抛光工艺(材料去除率 16~17.2 nm/min)^[14],MCF 抛光能够作为一种高效的加工方式。

2.2 表面粗糙度与硬度

用接触式探针测量各抛光斑的表面粗糙度,结果见表 2。随抛光时间和深度的加深,元件表面算术平均粗糙度 Ra 和最大高度粗糙度 Rz 先上升后下降,抛光 30 min 时表面最粗糙,60 min 的抛光表面粗糙度最理想。此外,将 MCF 抛光前后的

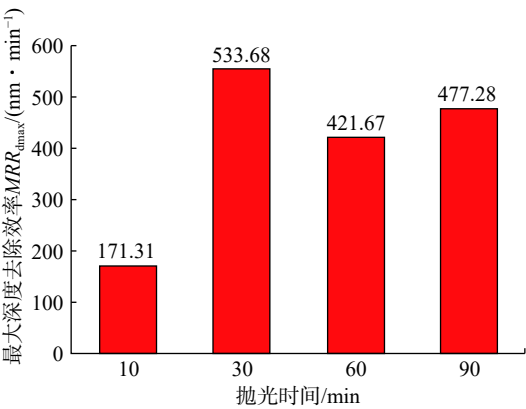


图5 抛光深度去除率

Fig. 5 Material removal rate in terms of depth

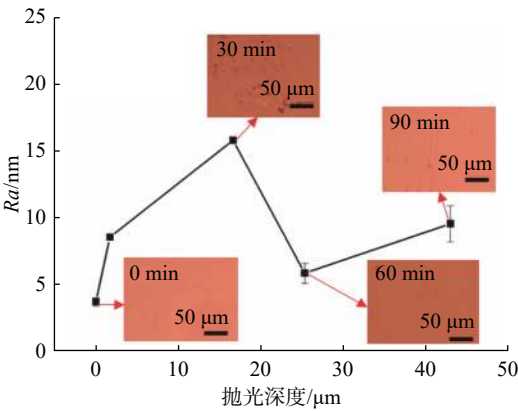


图6 表面粗糙度及微观形貌随抛光深度演变

Fig. 6 Surface roughness and micro-morphology with removal depth

元件置于金相显微镜(M230-21BLC, 200×)下观察抛光表面微观形貌变化。抛光表面 Ra 粗糙度及形貌演变规律如图6所示, 初始表面经亚微米级氧化铈化学机械抛光预处理, 亚表面裂纹、划痕等缺陷被表面水解层充分覆盖^[3], 因此, 初始表面光洁平整, Ra 粗糙度为 3.73 nm。随着 MCF 抛光的进行, 元件表面以下的亚表面缺陷被逐渐暴露出来。当 MCF 抛光深度达 16.6 μm (30 min)时, 亚表面缺陷被充分暴露, 粗糙度达到最大值 15.80 nm; 继续抛光至 25.3 μm (60 min)深度处, 逐渐接近 BK7 元件本体, 亚表面缺陷逐渐减少直至消失, 使得表面粗糙度有所下降, $Ra=5.86$ nm; 进一步增加抛光时间(深度), 抛光至 42.96 μm (90 min)时, 抛光表面出现沿 Y 向的抛光纹路, 这些抛光纹路使得粗糙度上升至 $Ra=9.57$ nm。由此说明, 为获得良好的表面及亚表面质量, MCF 抛光时间应控制在 30~60 min 内, 能够得到粗糙度低于 6 nm 的光洁表面。

使用维氏压头以 0.25 N 的载荷印压元件表面, 对不同抛光时间的抛光表面进行硬度测试。维氏压头相对面夹角 α 为 136°, 通过压痕仪自带显微镜测得平均压痕对角线长度 d , 利用式(1)计算出元件硬度 HV , 结果如表2所示。随着抛光时间(深度)增加, 元件的硬度值先上升后下降。

$$HV = 0.102 \times 2 \times \left(F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) / d^2 \quad (1)$$

式中: F 为载荷, N; α 为压头相对面夹角, $\alpha=136^\circ$; d 为平均压痕对角线长度, mm。

图7所示为元件表面维氏硬度与 Ra 粗糙度的关系曲线, 硬度与 Ra 粗糙度几乎成正相关关系, 拟合直线相关系数 $R^2=0.952$ 。由图6可知, 元件表面粗糙度的增加主要源于表面机械缺陷或抛光纹路引起的局部微观不平整, 表面不平整将使得印压过程中压头与元件本体材料接触不充分, 导致实际产生的压痕对角线长度 d 偏小, 因此, 最终算得的 HV 变大。

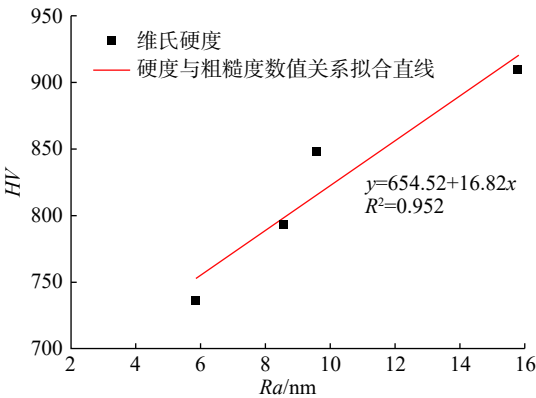


图7 抛光表面硬度与粗糙度关系

Fig. 7 Relationship between hardness and roughness

3 分析与讨论

3.1 磁场力与磁感应强度

根据 Preston 方程, 材料去除量与抛光轮转速以及抛光轮与元件之间的作用力等因素有关^[10]。在 MCF 抛光中, 抛光轮上的磨粒在磁场力驱动下向元件表面挤压, 通过磨粒对元件的作用力实现材料去除。因此, MCF 抛光中元件材料去除量将受空间磁场力的影响。磁场力 F 可通过式(2)计算^[14]得到:

$$F_x = V\chi H(\partial H/\partial x), F_y = V\chi H(\partial H/\partial y) \quad (2)$$

式中: F_x 代表 X 向的磁场力; F_y 代表 Y 向的磁场

力; V 代表磁性微粒体积; H 代表抛光区域的磁场强度; χ 是磁性微粒的磁化系数; $\partial H/\partial x$ 和 $\partial H/\partial y$ 分别代表沿 X 和 Y 方向的磁场强度梯度。由此可知, 磁场力与磁场强度 H 及其梯度有关。其中, 磁场强度 H 与磁感应强度(磁通密度) B 之间存在如下关系^[15]:

$$B = \mu H = \mu_0(1 + \chi)H \tag{3}$$

式中: μ 代表绝对磁导率; μ_0 代表空间磁导率。

由式(2)和式(3)可知, MCF 抛光中元件材料去除量与元件周围磁感应强度 B 有关。

为了充分理解 MCF 抛光的材料去除机理, 采用有限元方法对永磁铁周围的空间磁场分布进行仿真分析, 结果如图 8 所示。仿真时输入参数如下: 磁铁为钕铁硼材质, 尺寸为 40 mm(外径)×

25 mm(内径)×8 mm(宽度), 剩余磁通密度 0.4 T。图 8(a)所示为磁铁左右端面周围磁通密度分布云图, 可以看出, 距离磁铁外圆周围越远处, 磁感应强度越小。本实验中, 元件置于抛光轮下方 1.5 mm 处, 因此, 获取距抛光轮 1.5 mm 处元件表面磁通密度分布, 如图 8(b)所示, 虚线所示为永磁铁所在左右端面示意。垂直方向的磁感应强度在抛光轮中间为零, 在平行于抛光轮轴向的 X 方向上向磁铁左右端面靠近时逐渐增强, 在磁铁端面附近(距离抛光轮中心约±4 mm 处)达到最大约 42 mT; 水平方向的磁感应强度在抛光轮中间最大约 48 mT, 沿 X 方向两侧逐渐减小; 总的磁感应强度呈倒置“W”形, 在中间较小, 向磁铁端面靠近时逐渐增强, 在端面的边缘附近达到最大约 58 mT, 在端面之外迅速减小。

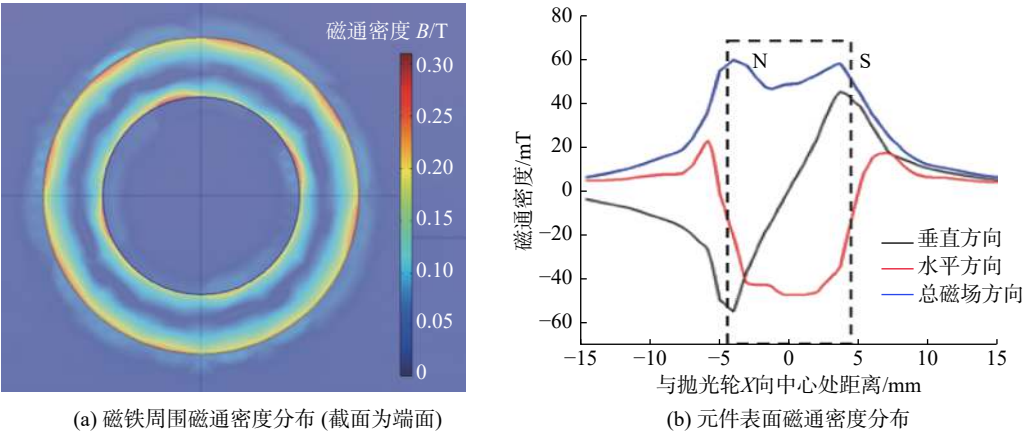


图 8 空间磁场分布
Fig.8 Spatial magnetic field distribution

3.2 材料去除率分析

磁场分布强弱很大程度上决定了包裹抛光磨粒(CeO_2)磁性簇的稳定性。磁感应强度越强处, MCF 形成的抛光链(磁性簇)就越稳定。一方面, 磁感应强度越强使得抛光头上吸附的磨粒较多, 因此作用于元件表面的有效磨粒数量增加; 另一方面, 较强的磁场力使得单颗磨粒对元件的切削作用力更强。因此, 磁场空间分布规律直接影响了抛光头对元件作用力的大小, 进而影响材料去除量和最终的抛光斑形貌。图 9 所示为 4 个不同时间抛光斑最小/最大材料去除深度(由图 3(a)获得)与其所在位置处磁通密度大小(由图 8(b)获得)的关系曲线。结果表明, 材料去除深度随磁通密度增加和抛光时间延长而显著增加。

因此, 抛光斑形貌的最终形成与磁场分布规律以及抛光头与元件作用时间有关。抛光时间在

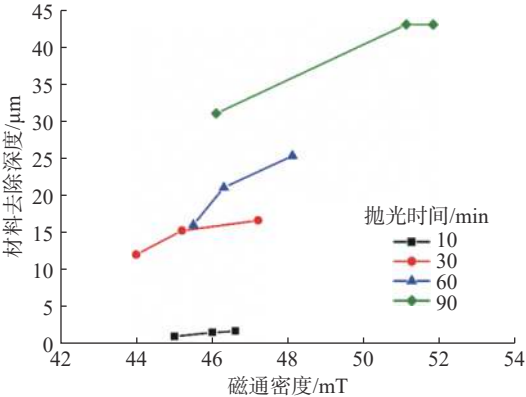


图 9 磁通密度与材料去除深度的关系曲线
Fig.9 Relationship between magnetic flux density and material removal depth

10~60 min 时, 抛光轮中部磁场最弱处材料去除量最低, 抛光轮中心两侧磁通密度越高处对应材料去除量越大, 最终形成“W”形抛光斑。因此, 随着抛光时间的延长和抛光斑表面长宽尺度增加, 材料去除深度最大位置将逐渐向磁通密度最强的磁铁端面靠近。

4 结 论

利用磁性复合流体对 BK7 光学元件进行抛光加工, 在同一元件表面不同区域设置不同的抛光时间, 研究材料去除效率、抛光斑轮廓及粗糙度、硬度随抛光时间的演变规律。通过本文研究可获得以下结论:

a. MCF 抛光斑沿平行于抛光轮轴向方向呈现“W”形, 且抛光斑长度、宽度与深度随抛光时间延长而增大。抛光时间达 90 min 时, 抛光斑中心出现局部微凸峰, 因此, MCF 与元件表面单点接触时间不宜过长。

b. 在本实验的条件下, 材料抛光深度去除效率在 30 min 时达最大 533 nm/min, 增加抛光时间使得材料去除效率有所下降。

c. 抛光表面粗糙度随元件亚表面缺陷的逐步暴露和去除而改变, 抛光深度达 25.3 μm (60 min) 时, 能够获得光洁的元件表面, $R_a=5.86\text{ nm}$ 。但抛光时间达 90 min 时, 会形成一定的抛光纹路, 不利于表面粗糙度的提升。此外, 元件硬度与表面粗糙度呈现较强的正相关性。

d. 有限元仿真和实验测试结果表明, 材料去除量不仅与空间磁场分布规律有关, 同时受到抛光液与元件作用时间的影响, 本文建立了材料深度去除量与磁通密度的关系曲线。抛光斑截面的“W”形轮廓的形成与磁通密度分布规律有关, 随着抛光斑长宽尺度的增加, 材料去除深度最大位置逐渐向磁通密度最强的磁铁端面靠近。

因此, 在 MCF 抛光高精度光学元件时, 应充分考虑元件表面及亚表面初始状态, 以便通过合理规划抛光路径和抛光液驻留时间确保最优的抛光条件, 实现尽可能高的材料去除效率并获得光滑无损的表面。本文的实验条件下, 抛光 30~60 min 内抛光斑形貌规则, 抛光过程稳定可控, 并能够获得材料去除率 $MRR>420\text{ nm/min}$, 粗糙度 $R_a<6\text{ nm}$ 的理想表面。

参考文献:

- [1] 戴一帆, 钟曜宇, 石峰, 等. 强光光学元件加工技术发展[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(23): 2788–2797.
- [2] 叶卉, 李亚国, 姜晨, 等. 湿法化学刻蚀技术处理抛光熔石英元件[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 382–389.
- [3] YE H, LI Y G, XU Q, et al. Resistance of scratched fused silica surface to UV laser induced damage[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 10741.
- [4] SHIMADA K, WU Y B, WONG 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(2): 242–247.
- [5] 钱大兵, 姜晨, 姚磊, 等. 非球面磁性复合流体抛光路径误差分析与仿真[J]. *光学仪器*, 2019, 41(5): 59–64.
- [6] 王嘉琪, 肖强. 磁流变抛光技术的研究进展[J]. *表面技术*, 2019, 48(10): 317–328.
- [7] WU Y B, WANG Y L, FUJIMOTO M, et al. Nanoprecision 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.
- [8] 袁巨龙, 邵琦, 吕冰海, 等. 基于流变原理的柔性接触抛光材料去除模型综述[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(3): 169–180.
- [9] 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.
- [10] 焦黎, 吴勇波, 郭会茹. 磁场分布对磁性复合流体抛光材料去除率的影响[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(17): 79–84.
- [11] 林龙侨, 王振忠, 陈世平. 3D 打印微结构工件的磁性复合流体抛光工艺研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2019, 58(1): 133–138.
- [12] 姜晨, 时培兵, 李佳音, 等. 磁性复合流体分散性及其对 BK7 光学玻璃抛光性能的影响[J]. *光子学报*, 2019, 48(5): 0516004.
- [13] 陈越. 光学玻璃磁流变抛光工艺试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [14] LI Y G, YE H, YUAN Z G, et al. Generation of scratches and their effects on laser damage performance of silica glass[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34818.
- [15] WANG C J, CHEUNG C F, HO L T, et al. A novel magnetic field-assisted mass polishing of freeform surfaces[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 279: 116552.