Modeling and Simulation 建模与仿真, 2025, 14(6), 135-141
Published Online June 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mos
https://doi.org/10.12677/mos.2025.146482

Hans汉斯

蓝宝石磁性复合流体抛光应力场分析与弹塑性去除机制研究

刘忠祥

上海理工大学机械工程学院，上海

收稿日期：2025年5月13日；录用日期：2025年6月6日；发布日期：2025年6月13日

摘　要

本文针对蓝宝石在磁性复合流体抛光中应力分布和材料去除机制开展研究，基于最小二乘法对实测轮廓进行高阶多项式拟合，准确反映抛光斑的真实三维形貌特征，结合Reynolds方程，仿真分析抛光区域压力，获得抛光区流体动压力分布规律，与实际抛光斑的几何特征具有高度一致性，结合Hertz接触理论，揭示了材料去除机制为弹塑性去除。

关键词

蓝宝石，磁性复合流体，流体动压，材料去除

Analysis of Stress Field and Elastoplastic Removal Mechanism in Sapphire Magnetic Compound Fluid Polishing

Zhongxiang Liu

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 13th, 2025; accepted: Jun. 6th, 2025; published: Jun. 13th, 2025

Abstract

This paper investigates the stress distribution and material removal mechanism of sapphire in magnetic composite fluid polishing. Based on the least squares method, the measured profile is fitted with a high-order polynomial to accurately reflect the true three-dimensional topographic characteristics of the polished spot. Combined with the Reynolds equation, the pressure in the polishing area is simulated and analyzed, yielding the distribution law of hydrodynamic pressure in the polishing zone, which exhibits high consistency with the geometric features of the actual polished spot.

文章引用: 刘忠祥. 蓝宝石磁性复合流体抛光应力场分析与弹塑性去除机制研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(6): 135-141.
DOI: 10.12677/mos.2025.146482

Furthermore, by integrating Hertz contact theory, it is revealed that the material removal mechanism follows an elastic-plastic removal mode.

Keywords

Sapphire, Magnetic Compound Fluid, Hydrodynamic Pressure, Material Removal

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

磁性复合流体(Magnetic Compound Fluid, MCF)抛光是一种基于磁流变效应与磨粒微切削相结合的高精度表面加工技术，通过外加磁场调控复合流体流变特性，形成具有 Bingham 塑性特征的柔性抛光头。在加工过程中，抛光头表面的磨粒与工件表面发生相对运动，利用微切削作用从而实现抛光工件材料去除，磁性复合流体抛光广泛应用于硬脆材料的超精密加工领域[1]。同时磁性复合流体抛光具有加工应力小、表面一致性高、等优势，在光学元件的超精密加工中展现出重要应用价值[2] [3]。在 MCF 抛光过程中应力场的分布特征直接影响磨粒的切入深度和运动轨迹。当局部应力超过材料的屈服强度时，则会发生塑性去除；而在应力集中区域，则可能引发脆性断裂，导致亚表面微裂纹[4]。此外，应力场的非均匀性还会影响表面形貌，例如过高的应力梯度可能导致“犁沟效应”，增加表面粗糙度[5]。

近年来，国内外研究人员对 MCF 抛光进行了丰富的探究。阎秋生[6]设计并提出三种表面结构抛光轮，分析了三种表面结构对工件表面流场压力分布的变化影响，实验表明相较于光滑和横条槽抛光轮，螺旋槽抛光轮抛光效率最高，表面粗糙度最低，可有效提高抛光效果。黄蓓[7]对蓝宝石磁流变抛光中的抛光路径、磁场排布进行研究，研究发现矩形轨迹加工的工件表面粗糙度分布更均匀、表面粗糙度值 Ra 更低，轴向充磁磁极反向排布的材料去除深度最大达到 17 μm。Zhang [8]通过均匀沉积法成功合成 Fe_3O_4@CeO_2 复合磨料，其降低了抛光液接触角，提高了磁流变液稳定性，增大了磁场下抛光液的剪切应力，提升了抛光效率。王有良[3]探究了抛光过程中 MCF 水分含量对 MCF 形貌特征、抛光区域温度、正压力与抛光质量的关系，构建 MCF 中水分对抛光质量的影响机理，研究发现在抛光过程中向 MCF 抛光液补充水分后，抛光正压力由 3.7 N 提升到 4.2 N，表面粗糙度下降率由无添加时的 69.97%提高至 86.69%，材料去除率由 0.95×10^8 μm^3/min 提升到 1.45×10^8 μm^3/min。

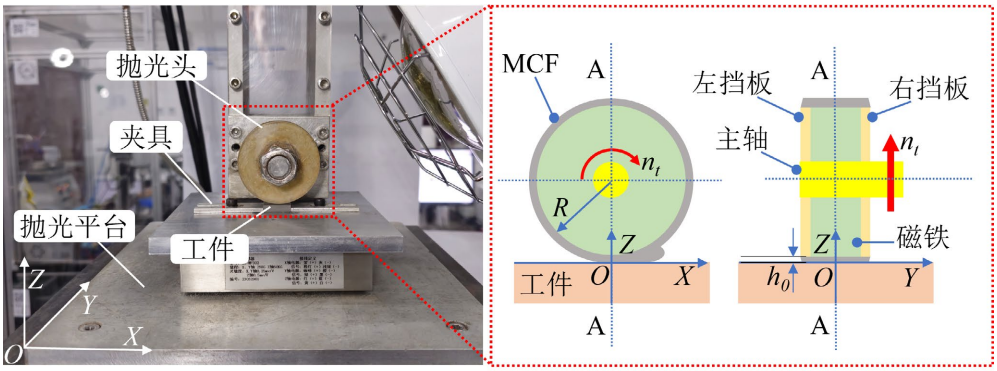
深入理解蓝宝石 MCF 抛光中应力场的形成机理与演化规律，对于实现纳米级超精密加工、优化工艺参数中的应用具有重要指导意义。

2. 实验

2.1. 抛光平台与原理

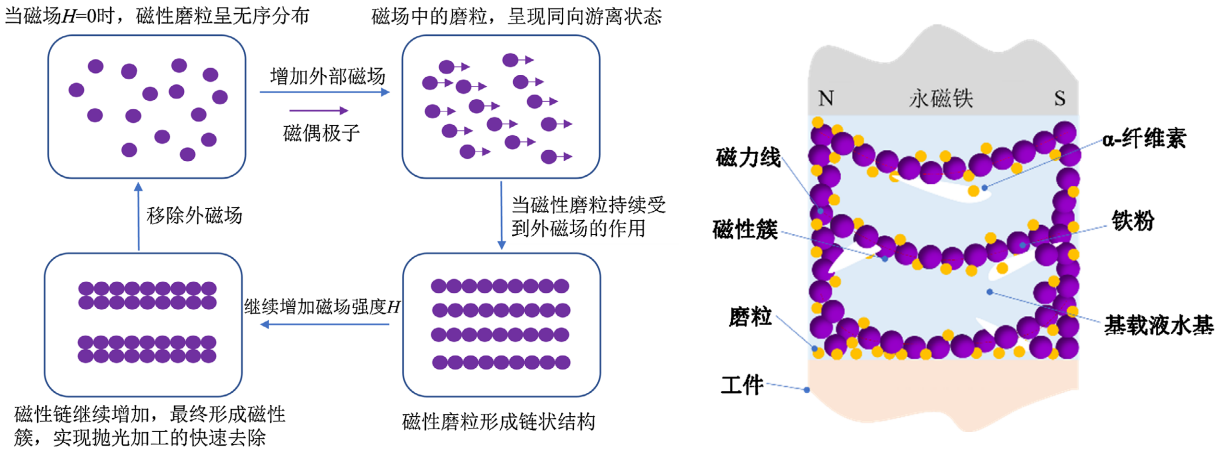
本实验利用自主搭建的卧式 MCF 抛光加工平台，进行蓝宝石工件抛光应力特性研究，抛光设备如图 1(a)所示。抛光头采用模块化设计，由伺服电机驱动，结构如图 1(b)所示，MCF 抛光头中间部件为环形钕铁硼磁铁，磁场强度为 0.4 T，左右两侧为环形聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)挡板，环形磁铁和 PMMA 挡板的外内径相同，分别为 60 mm、30 mm，厚度相同，分别为 5 mm 和 4 mm，抛光头以 n_t 的转速旋转。

本研究采用的 MCF 组成包括微米级羰基铁粉、纳米级磁性微粒、非磁性磨粒、α-纤维素和基液。在 MCF 抛光中，抛光头表面磁簇形成演化过程可分为四个阶段，如图 2(a)所示，当外部磁场为零，即不施加磁场时，MCF 中磁性微粒表现出随机布朗运动分布；施加磁场时，磁性微粒将在磁偶极矩作用下迅速排列构成链状结构；磁场强度进一步增强后，链状结构进而转变为柱状结构；最终在磁场撤除后，磁性微粒随即恢复为无磁场时的无序分布状态。图 2(b)为磁性复合流体抛光示意图，在施加的磁场影响下，磁性微粒形成链状结构，附着在抛光头表面并形成具有一定剪切力的柔性 Bingham 流体，磨粒则分布于磁簇表面。在抛光时，磁簇表面的非磁性磨粒可对抛光工件表面施加摩擦、挤压及剪切作用，利用划擦、剪切作用降低蓝宝石工件表面粗糙度并形成无亚表面损伤表面。



(a) 抛光加工平台　　(b) 抛光头结构示意图

Figure 1. Schematic diagram of MCF polishing platform and polishing head
图 1. MCF 抛光平台及抛光头示意图



(a) 磁性微粒的链化过程示意图　　(b) 抛光原理

Figure 2. Schematic diagram of magnetic cluster formation mechanism on the polishing head
图 2. 抛光头磁簇形成原理图

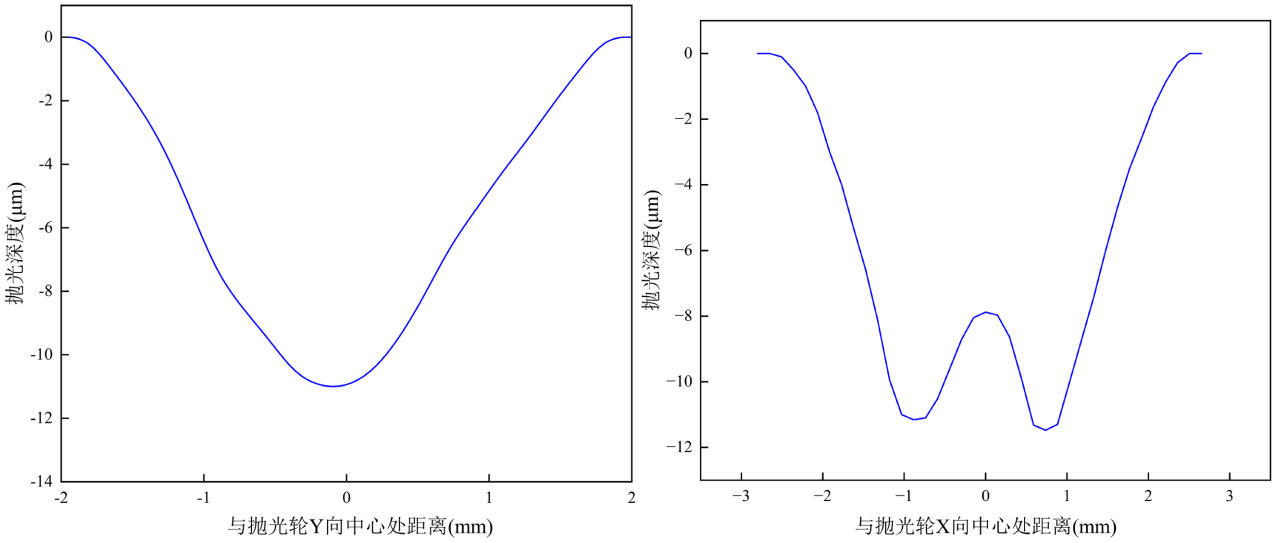
2.2. 样品制备及抛光斑轮廓拟合

该实验以 20 mm × 20 mm × 5 mm 的蓝宝石工件作为实验对象，蓝宝石工件在抛光前经过金刚石双面研磨，表面粗糙度 Ra 为 0.5 μm，抛光头转速 n_t 设为 400 r/min，抛光间隙 h_0 设为 0.8 mm。实验开始后，使用滴管向抛光头表面均匀滴入 3~4 g MCF 抛光液，对工件进行定点抛光，并每隔 10 min 补充约 1~2 g 的抛光液。所用 MCF 抛光液成分为磁性微粒(7.5 μm 铁粉和 10 nm 四氧化三铁)、非磁性磨粒(1

μm 金刚石)、α-纤维素、十二烷基苯磺酸钠以及去离子水依照 60:10:2:1:27 的质量比例混合搅拌而成，其中铁粉和四氧化三铁质量比为 2:1。抛光时间设置为 30 min，抛光完成后，对抛光斑的轮廓形貌进行检测。

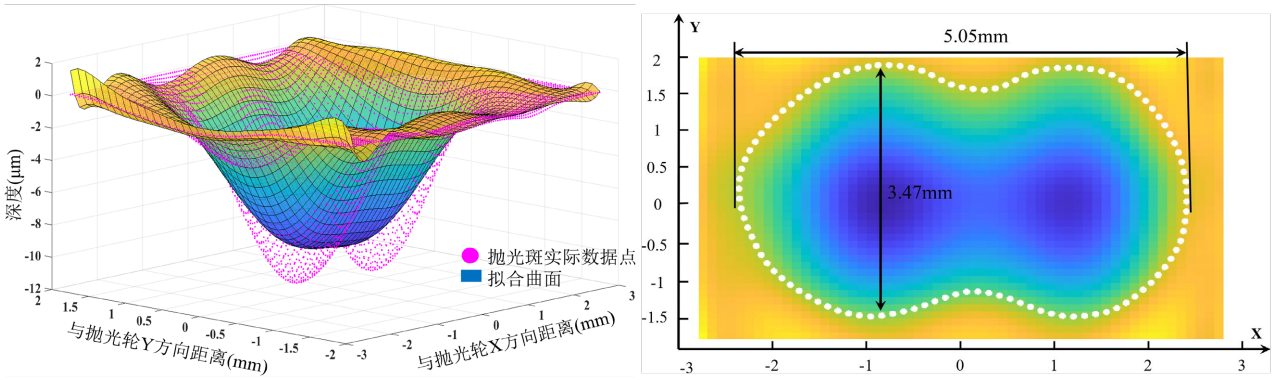
在抛光结束后采用表面轮廓仪对抛光后工件表面进行扫描采样，图 3 为工件表面抛光斑轮廓形状示意图。在垂直于 Y 轴方向的截面上，抛光截面呈“V”型，中心区域的材料去除量相对较多，在垂直于 X 轴方向的截面上，抛光截面呈“W”型，中心区域的材料去除量相对较少。

利用 MATLAB 将利用轮廓仪采样的表面轮廓数据进行三维曲面分析拟合。其中，X 轴和 Y 轴方向分别对应抛光斑的横向和纵向空间坐标，Z 轴表征表面高度信息。图 4(a)中红色散点表示实测数据点，彩色曲面为基于回归模型模拟的抛光斑三维形貌。经计算，该模型的拟合优度 R^2 = 93.4%，表明模型能够解释 93.4%的轮廓数据变异；显著性检验结果显示 P 值小于 0.001 (P < 0.001)，在统计学上具有高度显著性，充分证明该拟合曲面具有较高的可信度，能够准确反映抛光斑的真实三维形貌特征。



(a) 垂直于 Y 向截面轮廓　　(b) 垂直于 X 向截面轮廓

Figure 3. Schematic diagram of the polished cross-section profile
图 3. 抛光截面轮廓示意图



(a) 三维抛光斑拟合模型　　(b) 抛光斑二维轮廓

Figure 4. Three-dimensional and two-dimensional contours of polished spots
图 4. 抛光斑三维及二维轮廓

3. 仿真结果与分析

3.1. 抛光区域压应力分布

在 MCF 抛光过程中，蓝宝石工件所受的应力主要包括流体动压力、磁化压力、磁致伸缩压力以及磁性复合流体抛光液浮力等[9]。通过理论分析与实验验证发现[10]，由于磁性复合流体具有近似的不可压缩性，其在稳态抛光过程中产生的磁致伸缩压力可忽略不计，磁性复合流体抛光液浮力同样可予以忽略。因此，抛光区域的有效压应力主要由流体动压力和磁化压力构成。流体动压力 P_d 是决定材料去除特性的关键参数，流体动压力 P_d 大小受以下因素的综合影响：所用抛光液的流变特性、磁场强度(B)、抛光工艺参数等因素有关。流体动压力 P_d 的解析表达式可由下列 Reynolds 方程得到[11] [12]：

$$\frac{h^3}{\eta}\frac{\partial^2 P_d}{\partial x^2}+\frac{h^3}{\eta}\frac{\partial^2 P_d}{\partial y^2}+\left[3h^3-3z(z-h)\right]\frac{1}{\eta}\frac{\partial h}{\partial x}\frac{\partial P_d}{\partial x}=6(v-v')\frac{z}{h}\frac{\partial h}{\partial x} \tag{1}$$

式中：η 为 MCF 粘度，可通过旋转流变仪测得；h 为抛光头表面到抛光工件法向距离；v 为抛光头表面线速度；v'为磁簇外表面的线速度。将 MCF 最底端和抛光工件表面接触距离定义为浸没深度 D，通过图 5(a)几何关系，h 与浸没深度 D 存在直接关联。当 MCF 进入抛光区域时，磁性颗粒在磁场影响下形成不可压缩缎带，厚度为 H，抛光头半径为 R，抛光间隙为 h_0，即 $D=R+H-h_0$。图 5(b)为 MCF 在磁场作用下形成的磁簇形貌，借助超景深显微镜对其形貌进行表征得到如图 5(c)所示微观轮廓，可知磁簇最大高度 H 为 1.4 mm，抛光间隙 h_0 为 0.8 mm，得到该实验条件下浸没深度 D 为 0.6 mm。

Figure 5. Workpiece-polishing head contact model and microscopic morphology of magnetic clusters
图 5. 工件与抛光头接触模型及磁簇微观形貌

在建立流体动压力数值仿真模型时，对 Reynolds 方程边界条件进行如下设定：将抛光接触区域以外的边界压力值设为 0 [11] [12]，对仿真中关键参数设置如下：通过抛光头转速与抛光头直径换算得出抛光头与工件之间的线速度 v 为 75.5 m/min，浸没深度 $D=0.61$ mm，由 DHR-2 旋转流变仪测得 MCF 抛光液粘度 $\eta=170.47$ Pa·s。数值仿真计算结果如图 6 所示，抛光区域内流体动压力呈倒“W”型分布特征，抛光斑两侧出现明显的压力峰值，最大压应力为 22.41 kPa，利用旋转流变仪实际测得的抛光压应力为 24.45 kPa，对比仿真值与实际测量值的误差为 9.1%，验证了所建模型的可靠性。通过对比分析图 4(a)实际抛光斑三维形貌测量结果可以发现，仿真得到的流体动压力分布规律与实际抛光斑的几何特征具有高度一致性：压力峰值区域对应抛光斑的凹陷部位，而压力梯度变化趋势则与抛光斑边缘过渡区的形貌特征相吻合。这一结果验证了所建立的压力场仿真模型的准确性，同时也表明流体动压力分布是决定抛光斑形貌特征的关键因素。

3.2. 材料变形行为和去除机制

在 MCF 抛光过程中，磨粒压入蓝宝石工件表面的深度是决定材料去除行为的关键参数，并影响工件的亚表面损伤以及表面粗糙度。根据接触力学理论，磨粒的压入深度直接影响工件材料的变形机制，具体可分为三个阶段：弹性变形、弹塑性变形和全塑性变形。在蓝宝石 MCF 抛光过程中，磨粒压入深度

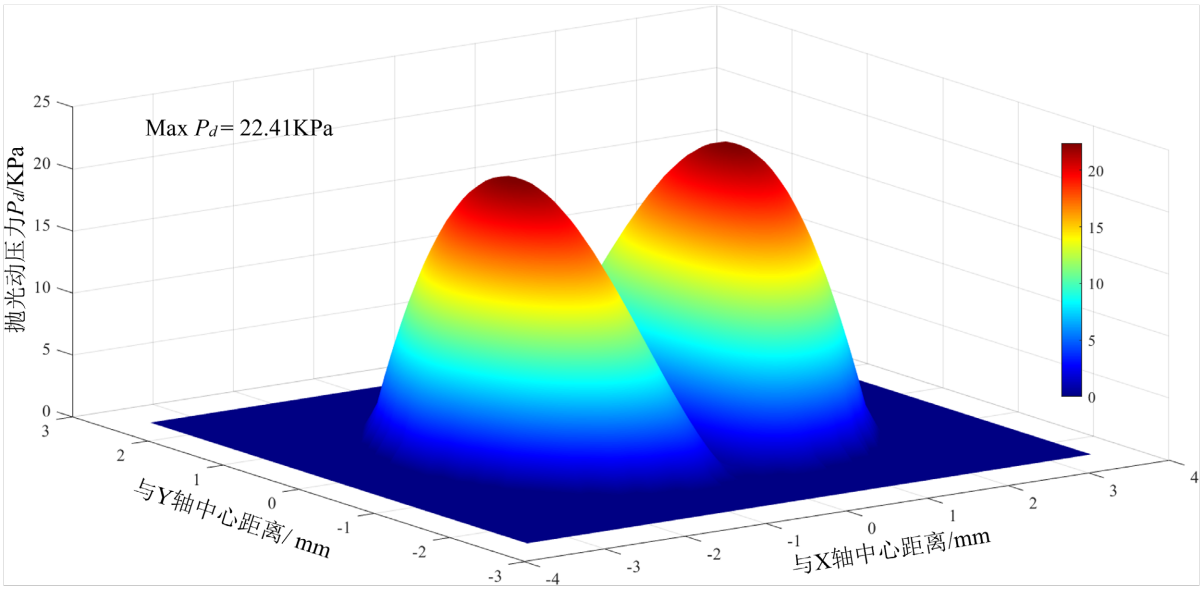


Figure 6. Spatial distribution law of MCF polishing fluid dynamic
图 6. MCF 抛光流体动压力空间分布规律

小于临界弹性变形深度时，蓝宝石工件仅发生可逆的弹性变形；伴随着磨粒压入深度继续增加，介于 δ_e 和临界塑性变形深度 δ 之间时工件随即发生弹塑性变形；当磨粒压入深度进一步增加，超过 δ 时，工件将发生全塑性变形，并伴随明显的材料去除。为定量描述这一过程，将磨粒简化为半径为 R 的理想球形，基于 Hertz 接触理论和 Johnson 塑性屈服准则，计算出抛光工件最大弹性压入深度 δ_e 和最小塑性变形压入深度 δ_p 分别为[13]：

$$\delta_e = \left(\frac{3\pi k H_W}{4E_W}\right) R \tag{2}$$

$$\delta_p = \frac{4}{k^2}\left(\frac{3\pi k H_w}{4E_w}\right) R \tag{3}$$

$$\delta = \frac{p x_1^2}{2 H x_2} \tag{4}$$

其中，金刚石磨粒粒径 $x_1 = 1\ \mu m$，磨粒尖端刃圆直径 $x_2 = 10\ nm$ [14]。将图 6 中的流体动压结果代入公式(4)得到磁性复合流体抛光时非磁性磨粒最大压入深度 δ = 0.35 nm，远小于临界塑性变形压深 δ_p = 25.02 nm。因此，在该研究的抛光方式中，材料均在弹塑性域实现去除。

4. 总结

本研究采用磁性复合流体抛光技术对蓝宝石工件进行定点抛光实验，对表面轮廓数据进行三维曲面拟合，获得抛光斑三维几何形貌，建立流体动压力数值仿真模型获得了压应力场分布规律。通过本文研

究主要获得以下结论：

(1) 抛光区域内的流体动压力呈现倒“W”型分布特征，在抛光头两侧流体动压力较大，该分布规律与抛光斑三维几何形貌具有高度一致性。

(2) 在本研究中，磨粒压入蓝宝石材料的深度远小于蓝宝石弹塑性去除临界深度，蓝宝石在 MCF 抛光中材料去除机制为弹塑性去除。

研究结果揭示了蓝宝石磁性复合流体抛光材料去除机理，有助于理解抛光斑形成过程和表面质量形成机制，有助于指导实际工程应用中提升材料抛光质量，获得高质量表面。

参考文献

[1] Xia, Z., Fang, F., Ahearne, E. and Tao, M. (2020) Advances in Polishing of Optical Freeform Surfaces: A Review. *Journal of Materials Processing Technology*, **286**, Article ID: 116828. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116828

[2] 叶卉, 李晓峰, 段朋云, 等. 光学元件磁性复合流体抛光特性研究[J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(4): 342-348.

[3] 王有良, 高熙淳, 张文娟, 等. 磁性复合流体抛光过程中水分对抛光性能的影响[J]. 光学精密工程, 2023, 31(24): 3559-3569.

[4] 邓有朋, 范佳宣, 郑岩, 等. 不完全信息下多智能体对手建模[J]. 航空学报, 2023, 44(S2): 433-452.

[5] 高继博. 磁性复合流体抛光机理及其使用寿命研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.

[6] 阎秋生, 汪涛, 黄展亮, 等. 蓝宝石光学曲面柱形宽缎带磁流变抛光仿真分析及实验研究[J]. 表面技术, 2024, 53(4): 140-151.

[7] 黄蓓. 蓝宝石光学曲面宽缎带轮式磁流变抛光实验研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2022.

[8] Zhang, Y., Lei, H., Zhang, J. and Luo, L. (2025) Performance and Mechanism of Fe_3O_4@CeO_2 Nano-Magnetic Abrasives in Magnetorheological Polishing. *Journal of Alloys and Compounds*, **1021**, Article ID: 179671. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179671

[9] 翟权. 蓝宝石半球面超声辅助磁流变抛光技术研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.

[10] Nomura, M., Makita, N., Fujii, T. and Wu, Y. (2019) Effects of Water Supply Using Ultrasonic Atomization on the Working Life of MCF Slurry in MCF Polishing. *International Journal of Automation Technology*, **13**, 743-748. https://doi.org/10.20965/ijat.2019.p0743

[11] Peiran, Y. and Shizhu, W. (1990) A Generalized Reynolds Equation for Non-Newtonian Thermal Elastohydrodynamic Lubrication. *Journal of Tribology*, **112**, 631-636. https://doi.org/10.1115/1.2920308

[12] Liu, J., Li, X., Zhang, Y., Tian, D., Ye, M. and Wang, C. (2020) Predicting the Material Removal Rate (MRR) in Surface Magnetorheological Finishing (MRF) Based on the Synergistic Effect of Pressure and Shear Stress. *Applied Surface Science*, **504**, Article ID: 144492. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144492

[13] Shi, F., Shu ,Y., Dai, Y.F., *et al*. (2013) Magnetorheological Elastic Super-Smooth Finishing for High-Efficiency Manufacturing of Ultraviolet Laser Resistant Optics. *Optical Engineering*, **52**, Article ID: 075104.

[14] 吕汉峰. 光学元件磁流变抛光去损伤加工工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.