

文章编号 1004-924X(2023)24-3559-11

磁性复合流体抛光过程中水分对抛光性能的影响

王有良^{1,4*}, 高熙淳¹, 张文娟², 郭江^{3,4}

(1. 兰州理工大学机电工程学院, 甘肃兰州 730000;

2. 兰州理工大学有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃兰州 730000;

3. 大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116024;

4. 大连理工大学宁波研究院, 浙江宁波 315016)

摘要:磁性复合流体(Magnetic Compound Fluid, MCF)具有优异的抛光性能,然而MCF抛光液中的水分在抛光过程中流失,抛光性能随之降低,这将增加抛光成本并严重影响MCF抛光的工程应用。针对磁性复合流体抛光液在抛光过程中水分流失的问题,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。首先,分析了抛光过程中不同水分占比抛光液对抛光性能的影响规律,采用工业相机观察MCF抛光液抛光前后的形貌特征。然后,通过总结抛光过程温升-磁流体状态-抛光作用力-抛光质量的内在联系,构建不同水分含量MCF的抛光机理。最后,通过向MCF抛光液中定量补充水分,有效地缓解了MCF抛光液抛光效果降低的问题。实验结果表明:(1)当MCF抛光液水分占比为45%时初始抛光效果较好,抛光10 min内工件的表面粗糙度由0.410 μm 下降到0.007 μm ;而使用已持续抛光50 min的MCF加工10 min后工件的表面粗糙度由0.576 μm 下降到0.173 μm 。MCF随着抛光时间的增加MCF抛光性能大幅下降;(2)随着抛光液中含水量的降低,抛光时磁性颗粒形成的链状结构恢复能力变差,进而影响其抛光性能;(3)在抛光过程中向MCF抛光液补充水分后,抛光结束时工件的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 $0.95 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$ 提升到 $1.45 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$,抛光正压力由3.7 N提升到4.2 N。当抛光过程中补充水分,使MCF的水含量占比维持在45%左右时,可以保持其长效稳定的抛光能力,有效地延长MCF的使用寿命。

关键词:磁性复合流体;抛光温度;抛光性能;表面粗糙度;材料去除率

中图分类号: TG580 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233124.3559

Influence of water in magnetic compound fluid on polishing performance

WANG Youliang^{1,4*}, GAO Xichun¹, ZHANG Wenjuan², GUO Jiang^{3,4}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China;

3. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

4. Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China)

* Corresponding author, E-mail: wangyouliang20@163.com

收稿日期: 2023-07-13; 修订日期: 2023-08-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 52265056); 甘肃省科技基金计划资助项目(No. 21JR7RA228); 兰州理工大学红柳优秀青年人才支持计划资助项目(No. 07/062004)

Abstract: Magnetic compound fluids (MCFs) have been shown to exhibit excellent polishing performance. However, problems with water wastage in MCF slurries during the polishing process can deteriorate their performance. This increases the costs of polishing using MCF slurries significantly, which substantially limits the application of MCF polishing technology. To address the issue of water loss in an MCF slurry, the relationships between the MCF's water content and the morphology, polishing temperature, normal pressure, and polishing quality of the MCF were investigated. The mechanism of the influence of moisture on polishing quality was also evaluated. First, the influences of different water content levels on the polishing properties of the fluid were analyzed. Additionally, the morphological characteristics of the MCF slurry before and after polishing were observed using industrial cameras. Then, the polishing mechanism of the MCF with varying water contents was examined by summarizing the internal relationship between temperature increases, the state of the MCF, and the force exerted in the polishing process as well as the quality of the resulting surface. Finally, the shortened lifespan of the MCF slurry was effectively alleviated by adding water. The following key results were obtained. (1) The initial polishing was better when the water content of the MCF polishing liquid was maintained at 45%. After 10 min of polishing, the surface roughness of the workpiece decreased from $0.410\ \mu\text{m}$ to $0.007\ \mu\text{m}$ using the initial MCF slurry. In contrast, it decreased from $0.576\ \mu\text{m}$ to $0.173\ \mu\text{m}$ using the MCF slurry that had been used for 50 min. The polishing performance of the MCF significantly decreased with increasing polishing time. (2) The ability of the MCF to recover worsened with decreasing water content in the slurry, which in turn affected its polishing performance. (3) The rate of decrease of the roughness of the polished surface after 60 min of polishing increased from 69.97% initially to 86.69% after adding water to the MCF slurry. The rate at which material was removed increased from $0.95 \times 10^8\ \mu\text{m}^3/\text{min}$ to $1.45 \times 10^8\ \mu\text{m}^3/\text{min}$, and the normal force of the polishing increased from 3.7 N to 4.2 N. When water is added to an MCF slurry during the polishing process, maintaining a water content of approximately 45% can improve the long-term stable polishing ability of the slurry and extend the service life of the MCF effectively.

Key words: magnetic compound fluid; polishing temperature; polishing performance; surface roughness; material removal rate

1 引言

随着现代科学技术的进步和高新技术产业的快速发展,航空航天、生物医学、微电子等行业对光学元件有着更高的精度要求^[1-2]。在医疗方面,医用X射线设备、内窥镜镜片等,都需要高表面质量、高光洁度的光学元件来保证检查效果;在军事领域,非球面镜片广泛应用于激光雷达光学系统中,以保证光信号的传输质量,提高探测能力。通过传统的加工方法虽然可以得到较低的表面粗糙度,但仍然存在加工精度低、加工质量不稳定及亚表面损伤等缺陷^[3],无法满足当前光学元件超光滑表面及较高形貌精度的要求。为了解决上述问题,磁场辅助抛光技术已被证明

是一种可行的超精密加工方法,广泛应用于具有高表面光洁度、高形貌精度要求的光学元件的超精密加工中。

磁场辅助抛光技术是通过外加磁场,使磁性流体内的铁磁性颗粒有序排列,形成一定强度的柔性加工工具。当柔性加工工具与工件形成相对运动,工件表面多余的材料将被去除,从而获得光滑表面^[4-5]。磁性辅助抛光技术包括磁流体(Magnetic Fluid, MF)抛光、磁流变液(Magneto-Rheological Fluid, MRF)抛光和磁性复合流体(Magnetic Compound Fluid, MCF)抛光^[6]。袁胜豪^[7]等通过磁流变抛光技术对石英玻璃样品进行抛光,探究了水含量对表面缺陷的影响,发现彗尾状缺陷随着抛光液中水含量的增加而减少,揭

示了水分含量对抛光液流动性的改善作用。由于 MF 抛光过程中颗粒分散能力强但去除能力较弱及 MRF 抛光过程中去除能力强但颗粒分散稳定性较差^[8-9], Shimada 等人^[10]将微米级羰基铁颗粒(Carbonyl Iron Powder, CIP), 非磁性磨料颗粒(Abrasive Particle, AP)和 α -纤维素添加至含有纳米级 Fe_3O_4 的水基 MF 中, 通过机械混合获得 MCF 抛光液。在磁场作用下, MCF 抛光液表现出良好的颗粒分散性和较强的抛光液黏度。目前磁场辅助磁性复合流体抛光技术已经应用于玻璃^[11]、无氧铜^[12]、不锈钢^[13]、镍磷镀层^[14]、PMMA^[15]和半导体材料的超精密抛光, 且获得了无亚表面损伤的超光滑表面。由于 MCF 抛光液的抛光性能随着抛光时间的增加大幅下降, 需要及时更换 MCF 抛光液来保证抛光效果, 严重影响了加工成本和效率。陆邦凯^[16]采用 CIP 浓度不同的抛光液对小曲率凹面的 K9 玻璃超精密抛光, 结果发现 CIP 浓度过高会影响抛光效果, 但其未进行长时间抛光研究磁流体状态变化。Nomura 等^[17]通过超声波雾化方式向 MCF 中添加水分提高 MCF 的使用寿命, 探究水分添加量的工艺参数, 未更深入地研究。综上所述, 目前还未有针对磁性复合流体的水分对抛光性能的机理研究, 因此本文通过探究了抛光过程中 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。

首先, 通过观察不同水分含量的 MCF 抛光液在抛光前后的形貌变化规律, 结合 MCF 抛光液在抛光过程中温度变化特征, 探究了 MCF 抛光液的水分对抛光作用力及表面质量的影响, 揭示了抛光作用的最优水分含量; 最终, 通过添加水分维持抛光液的含水量, 使抛光液达到较低的抛光液温升及稳定的抛光作用力, 并构建不同水分含量抛光液的作用机理, 为延长 MCF 的使用寿命提供理论基础。

2 实验原理及步骤

2.1 实验原理

图 1 为 MCF 抛光装置原理示意图。一圆柱状永磁铁以偏心距 r 吸附在磁铁座的底部, 磁铁座由电机 1 驱动旋转; 当磁铁座以 n_m 的速度旋转时, 永磁铁绕磁铁座的轴线旋转, 永磁铁旋转过程中磁通量密度保持不变, 但磁力线的方向会围绕着磁铁的旋转发生周期性变化, 从而产生空间动态磁场; 铝制载液板安装在距永磁铁左侧 δ 处, 并由电机 2 通过同步带驱动载液板以转速 n_c 绕主轴旋转; 红外热成像仪放置在工件的正后方, 与 MCF 抛光液保持在同一水平面上, 检测 MCF 抛光过程中的温度变化。通过注射器将定量的 MCF 喷射到载液板上, MCF 接触载液板的瞬间,

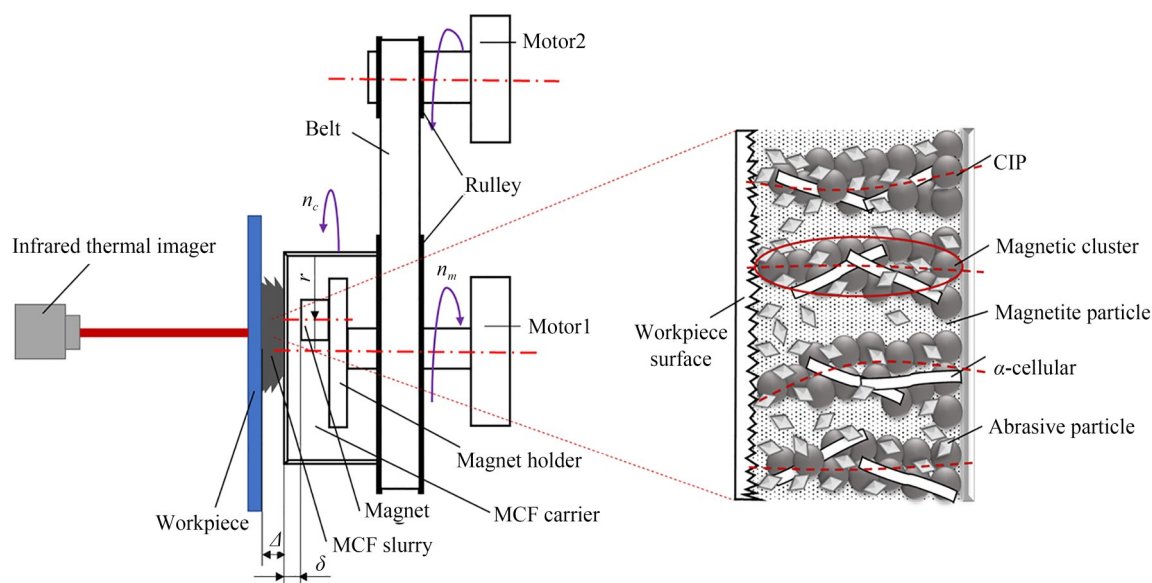


图 1 MCF 抛光装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of MCF polishing device

在外加磁场作用下,抛光液由无固定形态的牛顿流体迅速转化为具有一定黏稠性的宾汉(Bingham)流体^[19]。MCF抛光液中的磁性颗粒沿磁力线方向形成一条条磁性链状结构,众多磁性链状结构则形成如图1右侧所示的磁团簇。MCF抛光液中的植物纤维素,穿插在磁团簇内部增加MCF抛光液的黏弹性,提高抛光液的剪切能力。MCF抛光液在空间动态磁场中具有良好的颗粒分散性和形貌恢复能力,能够使不断更新的磨粒参与到抛光过程中。在磁悬浮力的作用下^[20],大部分夹杂在磁团簇中的非磁性磨粒颗粒被挤压到工件表面,从而产生一定的正压力 P 作用在工件表面;当工件与磨粒之间产生相对运动,磨粒对工件将产生微切削作用,从而达到材料去除的

目的,获得光滑表面^[21]。

2.2 实验装置

根据上述MCF抛光实验原理,搭建如图2所示的实验装置。该实验装置由三轴移动平台、电机控制器、柱状永磁铁、红外热成像仪、磁铁座、同步带轮和铝制载液板组成。为了减少其他零件被永磁铁磁化后对空间磁场产生的影响,抛光装置中的主体零部件材料均选用铝合金制品。MCF抛光头安装在三轴移动平台(定位精度为 $1\text{ }\mu\text{m}$)的 Y 轴上,通过控制 Y 轴的移动调整MCF抛光液与工件间的加工间隙,通过电机控制器控制载液板和磁场的旋转方向与转速;工件固定在 Z 轴平面上,通过调节三轴移动平台的 X 轴与 Z 轴确定工件与MCF抛光液的空间位置。

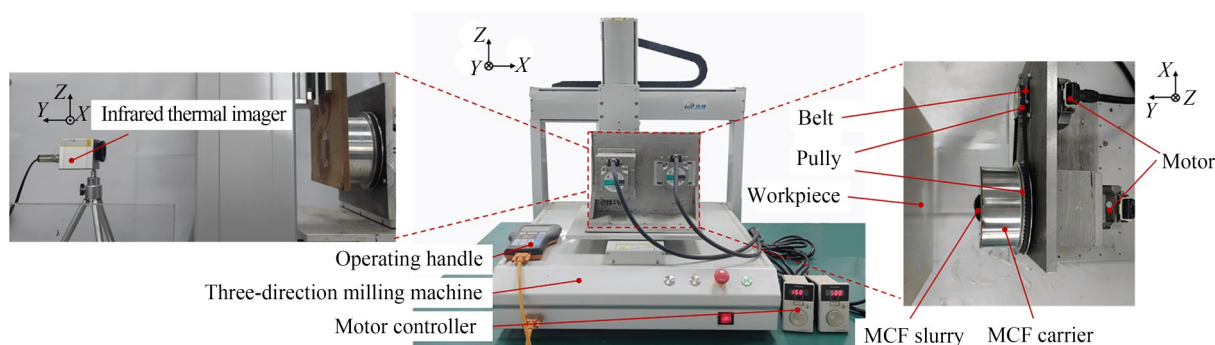


图2 MCF抛光装置

Fig. 2 Polishing device of MCF polishing process

2.3 实验条件

实验参数如表1所示。采用初始表面粗糙度在 $R_a 0.5\sim 0.6\text{ }\mu\text{m}$ 之间的聚碳酸酯板($L\times W\times t=70\text{ mm}\times 70\text{ mm}\times 1\text{ mm}$)作为被加工工件。为了保证工件表面初始粗糙度均一,抛光前采用800目的砂纸沿同一方向进行打磨,然后采用超声波清洗,最后采用压缩空气快速干燥。实验中所需的空间磁场由磁场强度为 0.5 T 的钕铁硼N52的柱状永磁铁($\varphi\times t=20\text{ mm}\times 10\text{ mm}$)提供。如表1所示, n_c 为载液板转速, n_m 为磁铁座转速, Δ 为加工间隙, V 为MCF抛光液的供应量, r 为磁铁的偏心距。

MCF抛光液是由CIP, Al_2O_3 磨粒和 α -纤维素按照一定的配比依次加入含有 Fe_3O_4 (平均粒径 10 nm)的水基MF,经过机械搅拌混合而成。MCF抛光液的水分占比是影响抛光过程中温度

变化和最终表面质量的重要因素。通过以往的研究^[18]表明,当MCF抛光液中磨粒的质量分数为12%、 α -纤维素为3%时,其抛光性能最佳。因此,本文通过调整CIPs与MF的占比,配制了4种不同质量分数混合比例的MCF抛光液,如表2所示,由于水基磁流体中98%为水分,故MCF1~4的水分占比分别为40 wt.%, 45 wt.%, 50 wt.%, 55 wt.%。由于普通水中含有大量的水合离子,这些水合离子会与抛光液中磁性粒子表面的正负离子相互作用,增大磁性颗粒团聚的可能性,影响磁性复合流体的性能。去离子水可以有效地减少水中的正负离子,被广泛地应用于磁性复合流体的制备中。本文均以去离子水为基载液制备或补充磁性复合流体抛光液。通过工业相机(HD205, 奥斯微)观察MCF抛光

液抛光前后的成形形貌,对比分析水分含量对抛光液形貌的影响规律,结合抛光后表面质量,探究水分含量与抛光效果的内在联系;通过红外热成像仪(PI450, Optris)观测不同组分 MCF 抛光液在抛光过程中的温度变化规律,对比 MCF 抛光液不同水分占比下的抛光效果;通过表面粗糙度仪(SJ-410, Mitutoyo)测量工件抛光前后的表面质量。

表 1 实验参数
Tab. 1 Experimental parameters

Parameters	Work-piece, $L \times W \times t$	Magnet	Magnet eccentricity, r	Magnet rotational speed, n_m	Polishing head rotational speed, n_c	Volume of MCF slurry supplied, V	Working gap, $\triangle$	Polishing time, t	
Value	PMMA: 70 mm $\times$ 70 mm $\times$ 1 mm	NdFeB N52: Φ 20 mm $\times$ h 10 mm	$B=0.5$ T	4 mm	600 r/m	500 r/m	1 mL	1 mm	10 min

表 2 MCF 组分
Tab. 2 MCF component

MCF slurry(Water content)	MF(~ 10 nm)	CIP($\sim 7\ \mu\text{m}$)	Al_2O_3 ($\sim 1\ \mu\text{m}$)	α -cellulose
MCF 1 (40 wt. %)	40.8 wt. %	44.2 wt. %	12 wt. %	3 wt. %
MCF 2 (45 wt. %)	45.9 wt. %	39.1 wt. %	12 wt. %	3 wt. %
MCF 3 (50 wt. %)	51 wt. %	34 wt. %	12 wt. %	3 wt. %
MCF 4 (55 wt. %)	56.1 wt. %	28.9 wt. %	12 wt. %	3 wt. %

3 结果与讨论

如图 3 所示为采用 MCF2 抛光 60 min 后工件表面的光学照片和抛光区域的红外测量温度图。从图 3(a)可以看出抛光后工件表面的光洁度较抛光前得到明显提升;为了更好地表示抛光区域的表面粗糙度变化,测量了抛光区域不同位置(P1,P2,P3)的表面粗糙度,并取其表面粗糙度平均值评价抛光后的表面质量。同时,测量 A-A 截面的轮廓线,对比抛光前后轮廓三维结构差值确定抛光材料去除量。图 3(b)为图 3(a)中对应区域的温度。此外,由于每个工件的初始粗糙度不完全相同,因此通过表面粗糙度下降率 $R_a\%$ 表示工件的抛光效果:

$$R_a\%=(1-R_{a_p}/R_{a_i})\times 100\%,\tag{1}$$

其中 R_{a_i} 和 R_{a_p} 分别表示抛光前后的表面粗糙度。

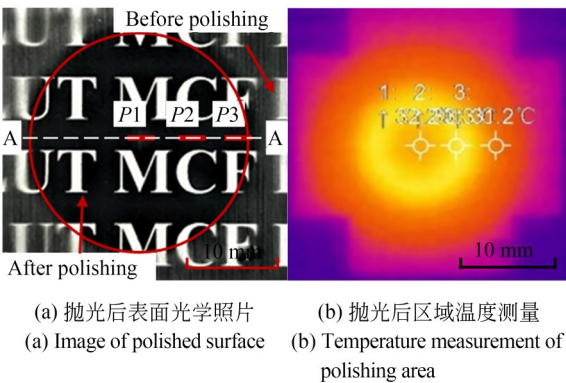
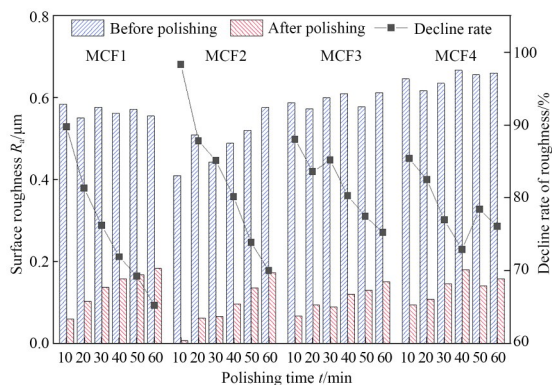


图 3 抛光后工件表面光学照片及红外温度测量图
Fig. 3 Images of polished surface and measured infrared temperature

3.1 不同水分含量对抛光效果的影响

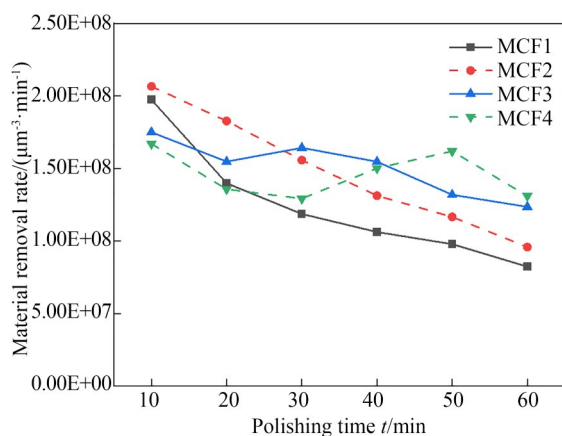
为探究不同水分含量的 MCF 抛光液的抛光性能,分别使用不同水分占比的 MCF 抛光液对工件抛光 10 min,之后更换新的工件而 MCF 抛

光液不更换,持续抛光 6 个工件即连续抛光 60 min。测量各工件的初始及抛光后表面粗糙度及表面轮廓,得到如图 4 所示的表面粗糙度、下降率及材料去除率的变化趋势。



(a) 表面粗糙度及其下降率随抛光时间的变化

(a) Surface roughness and its decline rate change with polishing time



(b) 材料去除率随抛光时间的变化

(b) Material removal change with time

图 4 表面粗糙度、下降率及材料去除随抛光时间的变化
Fig. 4 Surface roughness, decline rate and material removal change with time

从图 4 中可以看出, MCF1 和 MCF2 的抛光性能随抛光时间的增加而线性下降, 而 MCF3 和 MCF4 呈现出先下降后上升再下降的趋势。但可以看出无论为何种浓度的抛光液, 其整体抛光效果最终都会随着抛光时间的增加而下降, 且抛光液抛光效果越来越差。其中, MCF2 抛光液在初始状态表现出优异的抛光性能, 所得到的工件表面粗糙度由抛光前的 $0.410 \mu\text{m}$ 下降到 $0.007 \mu\text{m}$, 表面粗糙度下降率高达 98.29%, 材料去除

率为 $2.06 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$ 。但当 MCF2 抛光液经过长时间的持续抛光后, 其抛光性能已经发生明显的变化, 在第 50~60 min 内, 工件的表面粗糙度由 $0.576 \mu\text{m}$ 下降到 $0.173 \mu\text{m}$, 表面粗糙度下降率下降到 69.97%, 材料去除率下降至 $0.95 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$ 。由此可以看出, MCF2 抛光液在经过 60 min 的持续抛光后, 其抛光性能大幅下降。而 MCF3 和 MCF4 在最初的 10 min 抛光表面粗糙度下降率均低于 90%; 但是连续抛光 60 min 后, 其工件表面粗糙度均优于 MCF1 和 MCF2。

在抛光过程中使用相机观察 MCF 抛光液抛光前后的形貌特征, 如图 5 所示。可以看出, 抛光前 MCF 形成的磁团簇呈“针状”, 并且磁团簇随着抛光液中含水量的增加由粗壮转变细小形态; 值得注意的是, 初始状态的 MCF4 中可以观察到大量的水分未能融入到磁团簇中。MCF 持续抛光 60 min 后的形貌显示, 在抛光结束后, MCF1 磁团簇的针状结构已完全消失, 取而代之的是大量磁簇凝固形成“扁平状”结构, 此时的磁簇在动态磁场作用下已完全失去恢复能力, 即此种状态下的 MCF 已失去自锐性; MCF2 中的大部分磁簇发生粘结, 形成大的片状或块状团簇, 整体呈现“花瓣状”, 磁团簇的恢复能力较差; MCF3 和 MCF4 在使用后出现了较为粗壮的针状结构, 此时的磁团簇仍有良好的恢复能力。可以看出, 相较于初始状态, 在抛光结束后 MCF 抛光液中的水分流失, 这可能是由于抛光过程中磨粒的微切削作用使得 MCF 的温度升高所导致。

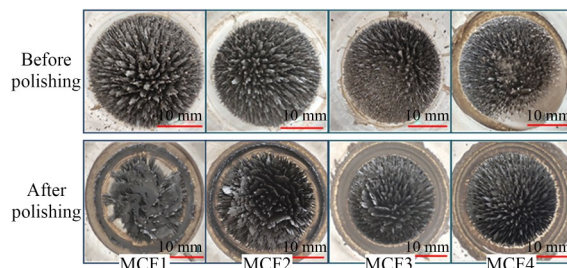


图 5 不同水分占比的 MCF 抛光前后形貌对比图

Fig. 5 MCF morphologies of different water content before and after polishing

图 6 为抛光过程中抛光液温度的变化趋势图。由图可知, 随着抛光液中水分占比的逐渐增大, 抛光过程中抛光液的最大温度和温升变化范

围越来越小。MCF1在抛光10 min后,抛光液温度急剧上升;而MCF2在抛光50 min后才阶梯状的温升变化;MCF3和MCF4在抛光过程中,抛光液温度变化平缓。这是由于随着水分含量的增加,水分对MCF抛光过程中磨粒与工件微切削作用造成的温升产生的冷却作用增强。MCF1中水分含量较少,抛光一段时间后,水分蒸发减少,磨粒和工件之间由润滑摩擦转变为干摩擦;而MCF3和MCF4中水分含量较多,极大地提高了冷却能力,使得抛光过程中温度变化较小,抛光液的整体温升偏低。

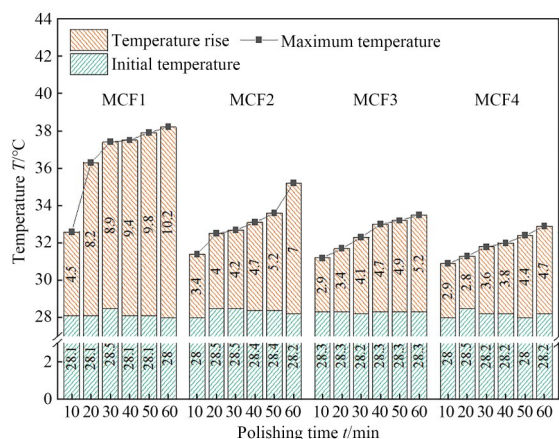


图6 不同组分MCF抛光温度随时间变化

Fig. 6 Variation of polishing temperature with time for different components of MCF

采用三向测力仪(9257B, Kistler)测试抛光过程中MCF正压力随加工时间的变化曲线,如图7所示。结果表明,MCF1和MCF2抛光开始时正压力较高但呈线性下降,随后持续缓慢下降;抛光60 min后,MCF1的正压力稳定在1.7 N左右,MCF2的正压力稳定在3.7 N左右。这是由于MCF1和MCF2中水分的流失导致抛光液干燥,从而致使抛光液内的磁性链状结构失去恢复能力,不能恢复到原来链长,导致正压力持续下降。而MCF3和MCF4抛光时,随着加工时间的增加,正压力先下降,随后出现回升,到达最高点后再次下降。由于初始状态下MCF3和MCF4磁团簇细小,在高速剪切下容易断裂,导致正压力下降迅速;随着抛光液中水分的蒸发,抛光液的固体浓度增加,正压力有所恢复。MCF3的正压力在第34 min左右恢复至最高6.3 N,而

MCF4在第53 min左右恢复至最高4.8 N。此结果也验证了图4所示的MCF3和MCF4在抛光30 min和50 min时,表面粗糙度下降率和材料去除率显著提高。但由于MCF3和MCF4中的其它组分持续损耗,所以两者抛光力达到最大值也低于先前状态的MCF2。之后随着水分的不断流失,导致出现了类似于MCF1和MCF2干燥的情况,正压力持续下降。

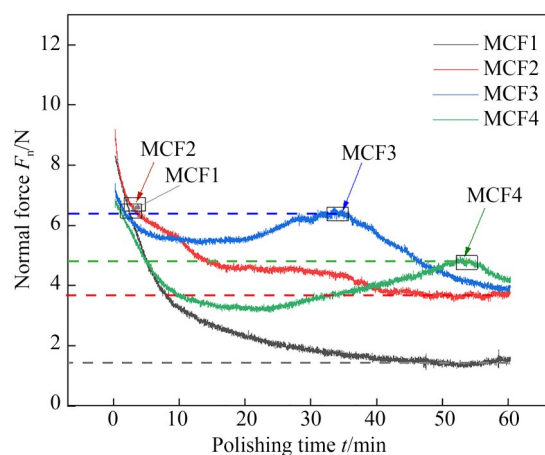


图7 不同水分占比的MCF正压力随时间变化图

Fig. 7 Normal force of MCF with different water content over time

3.2 水分对抛光质量的影响机理

结合磁团簇的成形状态以及抛光过程中的作用力,构建图8所示的不同含水量下磁团簇结构,探究水分对抛光质量的影响机理。如图8(a)所示,当抛光液中的含水量较高时,其在外加磁场作用下形成的磁团簇较为细小,且铁磁性颗粒较少导致形成的链状结构中CIP之间的间隙较大,大量磨粒附着在间隙中导致作用于工件表面的磨粒数目减少;且抗剪切屈服应力较低,在载液盘的高速旋转下,磁簇易断裂,因此其产生的正压力较小,从而导致抛光性能较差;而当含水量适中时,如图8(b)所示,抛光液的链状结构较为稳定,使得磁团簇具有较高的抗剪切能力、良好的恢复能力和颗粒分散性,此时的磁团簇表现出优秀的抛光性能;图8(c)为含水量较少时磁团簇的结构示意图,此时抛光液较为干燥,MCF抛光液的流动性和恢复能力较差,因此在抛光过程中磁团簇很容易出现堆积和粘结的现象,极大地

限制了磨粒在抛光液中的运动,导致其抛光能力下降。因此当抛光液发生干燥时,向磁团簇中补充水分可以使堆积状的磁团簇均匀的分散开,使被夹杂在磁团簇间的磨粒释放出来,有效

地提高抛光液的抛光能力。为了验证上述机理,基于初始状态抛光性能优异的MCF2抛光液,在抛光过程中添加水分探究其对抛光质量的影响规律。

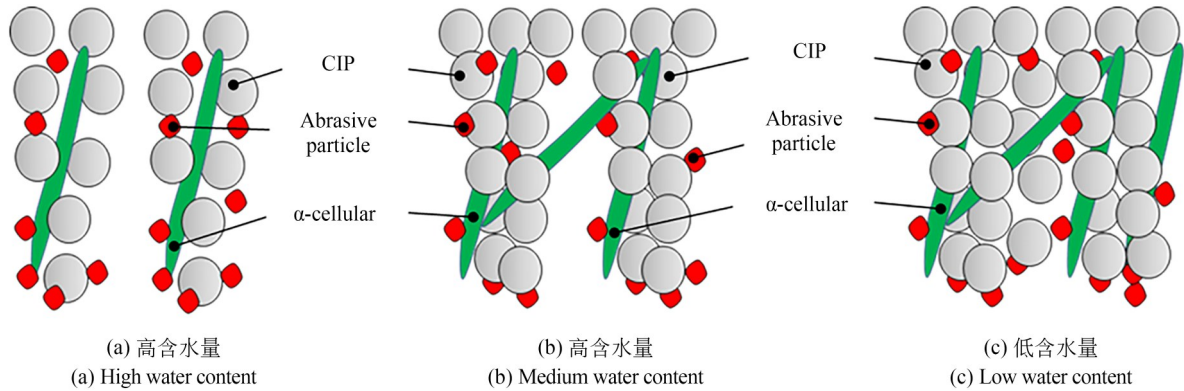


图 8 含水量不同时簇状结构的形成机理

Fig. 8 Formation mechanism of clustered structures with different water content

3.3 补水后 MCF 抛光性能

假设 MCF 抛光过程中仅有水分流失,采用电子天平(LQ-Y,乐棋)对抛光前后的 MCF2 抛光液称重发现:经过 60 min 连续抛光后,抛光液质量共减少了 0.657 g。因此,在工件抛光 10 min 后,向 MCF2 抛光液中加入 0.1 ml 的去离子水,再抛光下一个工件。

图 9 为采用 MCF2 连续抛光过程中是否补充水分对表面粗糙度、粗糙度下降率及材料去除率

的影响规律。图 9(a)表明,MCF2 在连续抛光过程中,无论是否添加水分,工件表面抛光后质量均得到提升。但是随着抛光时间的增加,表面粗糙度下降率降低,并且添加水分后的 MCF2 抛光 60 min 后,其表面粗糙度下降率为 86.69%,远远高于未添加水分的 69.97%,提高了 16.72%。图 9(b)表明,无论是否添加水分,抛光液对于工件的材料去除率随着抛光时间的增加而下降,但是添加水分的抛光液作用工件的材料去除率下降

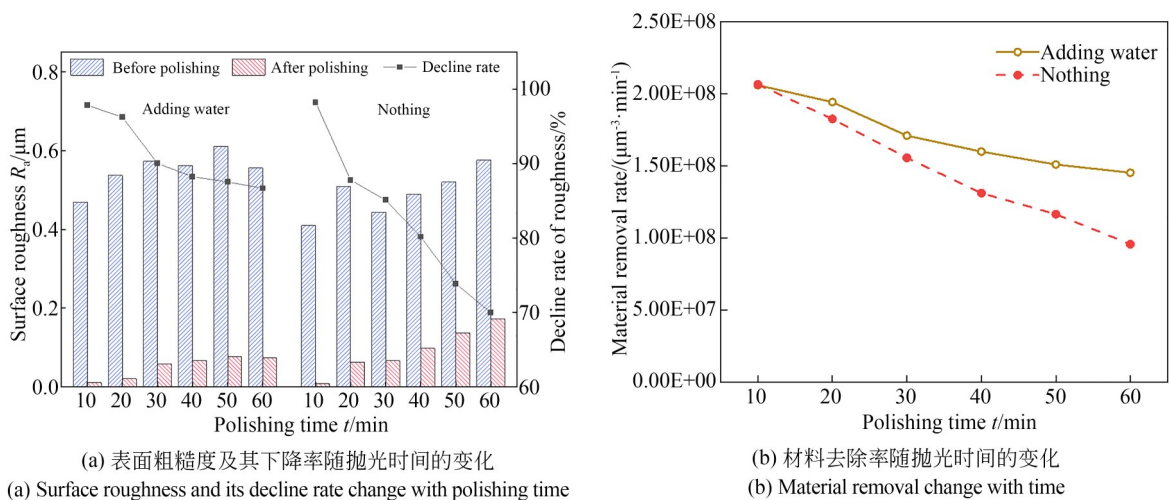


图 9 表面粗糙度、下降率及材料去除随抛光时间的变化

Fig. 9 Changes of surface roughness, decline rate and material removal with polishing time

较缓。抛光 60 min 后,材料去除率由 $0.95 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$ 提高至 $1.45 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$, 提高了 $0.5 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$ 。由此可见,抛光液的抛光能力在补充水分后有较为明显的改善,干燥的磁团簇补水后能够重新生成针状结构。通过向抛光液中补充水分可以有效地缓解 MCF 抛光液持续抛光后抛光性能失效问题。

图 10 为 MCF2 连续抛光 60 min,每 10 min 添加 0.1 ml 去离子水后的 MCF 抛光液变化图。对比图 5 发现,补充水分可以使抛光液长时间保持良好的形貌特征,直到抛光结束时,抛光液才表现出较为明显的干燥,但其整体的形貌变化相较于未加水状态时的抛光液已经得到了较为明显的控制,有效地减缓了抛光液干燥的速度。

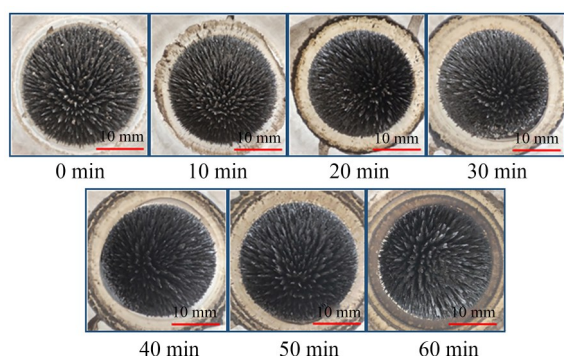


图 10 MCF2 添加水分不同抛光时间的状态

Fig. 10 Morphologies of MCF2 at different polishing time with supplying water

图 11 为补充水分前后抛光液的温度随抛光时间的变化图。由图可知,在有水分添加的情况下,抛光液的整体温度仍会持续升高,但在抛光过程中明显地控制了抛光液的温度,抛光后期整体的温升得到了有效地抑制,从而缓解了抛光液水分流失情况,使后期的抛光性能更加稳定。

图 12 为补充水分后 MCF 正压力随时间的变化图。可以看出,当在 MCF 抛光液中加入水分后,抛光过程中的正压力有所恢复,明显优于未添加水时的抛光液,最终当持续抛光结束时其正压力为 4.2 N,接近于未添加水时 20~30 min 的抛光正压力。这是因为抛光液中加入的去离子水不仅可以补充抛光中流失的水分,恢复 MCF 抛光液的流动性,使磨粒在抛光液中均匀分布,还可以充当冷却液的作用控制抛光过程中的温

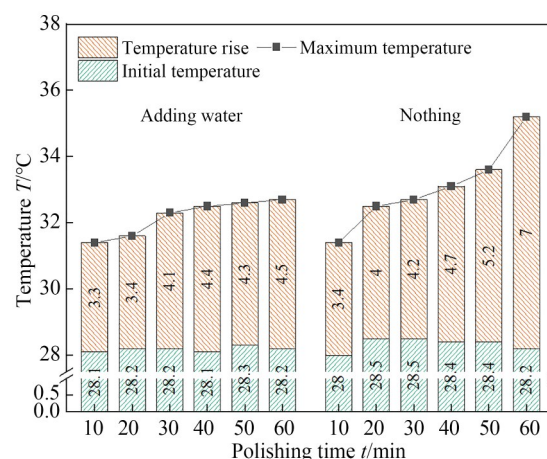


图 11 补充水分的 MCF 抛光温度随时间变化图

Fig. 11 Polishing temperature variation of MCF over time with supplementary water

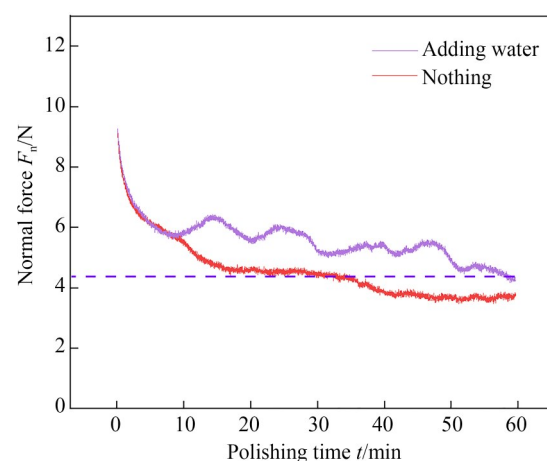


图 12 补充水分的 MCF 抛光液的正压力随着时间变化
Fig. 12 Normal force variation of MCF over time with supplementary water

度,减缓水分的流失。因此在加入水分后的一段时间内,正压力会短暂回升,但随着抛光时间的增加,水分仍会以蒸发的形式流失,且整体正压力仍呈现下降趋势,这说明即使补充水分恢复其水分流失的部分,但因抛光液中其他组分的损耗,仍然会使 MCF 抛光液的抛光性能缓慢下降。因此后续工作将对抛光液中其他组分对抛光质量的影响规律进行深入探究。

4 结 论

本文通过对不同含水量下的 MCF 抛光液进行分析,得到不同组分 MCF 在抛光过程中温升、

磁流体状态、抛光作用力与抛光质量之间的关系,构建不同水分含量MCF的抛光机理,最终为了保持MCF中的水含量,对MCF进行水分补充试验,实现了MCF抛光液长效稳定的抛光能力,为延长MCF的使用寿命提供了理论基础。得到结论如下:

(1) 随着抛光时间的增加,中低含水量的MCF抛光表面粗糙度、材料去除率及抛光力持续下降,抛光温升较大;而高含水量的MCF抛光表面粗糙度、材料去除率及抛光力先下降后上升再下降,抛光温升较平稳;

(2) 随着MCF含水量的降低,MCF在抛光过程中经过三个结构转变:“针状”、“花瓣状”和“扁平状”。抛光液中的水分通过影响磁团簇链状结构的稳定性和抛光液中磨粒的运动进而改变其抛光性能;

(3) 抛光过程中向MCF补充水分,在抛光结束时工件的表面粗糙度下降率由未补充水时的69.97%提升到86.69%,材料去除率由 $0.95 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$ 提升到 $1.45 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$,抛光正压力由3.7 N提升到4.2 N。保持MCF的水含量在45%左右,可以有效地延长MCF的使用寿命。

参考文献:

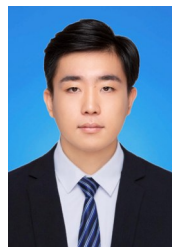
- [1] 王承遇,李松基,陶瑛,等.超光滑超精密玻璃抛光新技术[J].玻璃,2009,36(10):33-37.
WANG C Y, LI S J, TAO Y, *et al.* New super-smooth and super-precision polishing technology for glass surface[J]. *Glass*, 2009, 36(10): 33-37. (in Chinese)
- [2] 张韬,何建国,黄文,等.机械轴与虚拟轴复合的磁流变抛光[J].光学精密工程,2021,29(2):286-296.
ZHANG T, HE J G, HUANG W, *et al.* Magnetorheological finishing method that combines mechanical and virtual axes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(2): 286-296. (in Chinese)
- [3] 李改灵.光学材料磨削加工亚表面损伤测量的理论与实验研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006.
LI G L. *Theoretical and Experimental Research on the Measurement of Grinding Subsurface Damages for Optical Materials*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [4] 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):173-175,182.
KANG G W. Research and development of magnetorheological finishing[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008, 36(3): 173-175, 182(in Chinese)
- [5] 赵卫,豆立博,刘玲.磁流变抛光技术在SiC晶片加工工艺中的应用研究[J].价值工程,2018,37(11):222-223.
ZHAO W, DOU L B, LIU L. Application research on magnetorheological finishing in the SiC wafer processing [J]. *Value Engineering*, 2018, 37 (11): 222-223. (in Chinese)
- [6] 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):24-33.
JIANG C, SHI P B, LI J Y, *et al.* Dispersion of magnetic compound fluid and its effect on polishing properties of BK7 optical glass[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(5): 24-33. (in Chinese)
- [7] 袁胜豪,张云飞,余家欣,等.磁流变抛光中表面彗尾状缺陷的生成与演变行为[J].光学精密工程,2021,29(4):740-748.
YUAN S H, ZHANG Y F, YU J X, *et al.* Formation and evolution behavior of comet-tail defects in magnetorheological finishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(4): 740-748. (in Chinese)
- [8] 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 F, ZHANG B Z. Surface roughness of optical elements fabricated by magnetic fluid-assisted polishing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 34-39. (in Chinese)
- [9] 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.
WANG J Q, XIAO Q. Research progress of magnetorheological polishing technology [J]. *Surface Technology*, 2019, 48(10): 317-328. (in Chinese)
- [10] SHIMADA K, AKAGAMI Y, KAMIYAMA S, *et al.* New microscopic polishing with magnetic compound fluid (MCF)[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2002, 13(7/8): 405-408.
- [11] 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.

- YE H, LI X F, DUAN P Y, *et al.* Magnetic compound fluid polishing characteristics of optical elements [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2021, 43(4): 342-348. (in Chinese)
- [12] WANG Y, WU Y, GUO H, *et al.* A new magnetic compound fluid slurry and its performance in magnetic field-assisted polishing of oxygen-free copper [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(17).
- [13] ZHANG W J, ZHANG X J, WU Y B, *et al.* Experimental study on the polishing of aspheric surfaces on an S-136 mould steel using magnetic compound fluid slurries [J]. *International Journal of Abrasive Technology*, 2020, 10(3): 155.
- [14] 郭会茹, 吴勇波, 焦黎, 等. Ni-P 镀层的磁性混合流体抛光 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(17): 73-78.
- GUO H R, WU Y B, JIAO L, *et al.* Ultrafine polishing of nickel phosphorus plating with magnetic compound fluid slurry [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(17): 73-78. (in Chinese)
- [15] GUO H R, WU Y B. Ultrafine polishing of optical polymer with zirconia-coated carbonyl-iron-particle-based magnetic compound fluid slurry [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(1): 253-261.
- [16] 陆政凯, 郭会茹, 吴勇波. 小曲率凹面光学玻璃的磁性混合流体精密抛光 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(9): 1314-1324.
- LU Z K, GUO H R, WU Y B. Magnetic compound fluid polishing of concave optical glass with small curvature [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(9): 1314-1324. (in Chinese)
- [17] NOMURA M, MAKITA N, FUJII T, *et al.* Effects of water supply using ultrasonic atomization on the working life of MCF slurry in MCF polishing [J]. *International Journal of Automation Technology*, 2019, 13(6): 743-748.
- [18] 高继博. 磁性复合流体抛光机理及其使用寿命研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- GAO J B. Study on Finishing Mechanism and Service Life of Magnetic Compound Fluid [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [19] SHIMADA K, WU Y, 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.
- [20] FENG M, WU Y B, WANG Y L, *et al.* Effect of the components of Magnetic Compound Fluid (MCF) slurry on polishing characteristics in aspheric-surface finishing with the doughnut-shaped MCF tool [J]. *Precision Engineering*, 2020, 65: 216-229.
- [21] 姜晨, 刘剑, 魏久祥, 等. h 形磁性复合流体抛光工具设计及工艺试验 [J]. *光学精密工程*, 2022, 30(12): 1452-1461.
- JIANG C, LIU J, WEI J X, *et al.* Design and process test of h-shaped magnetic composite fluid polishing tool [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(12): 1452-1461. (in Chinese)

作者简介:



王有良(1986—),男,河南荥阳人,博士,副教授,硕士研究生导师,2009 年于河南科技大学获得学士学位,2012 年于兰州理工大学获得硕士学位,2016 年于日本秋田县立大学获得博士学位,主要从事多场(磁场、电场、化学场等)辅助精密超精密加工等方面的研究。E-mail: wangyouliang20@163.com



高熙淳(1999—),男,河北卢龙人,硕士研究生,2021 年于兰州理工大学获得学士学位,主要从事磁场辅助抛光的研究。E-mail: gl_119@qq.com