

文章编号 1004-924X(2025)12-1902-14

磁性复合流体抛光性能稳定性与使用寿命研究

王有良^{1,2}, 于璞垚^{1*}, 高熙淳¹, 张文娟³, 吴勇波⁴

(1. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 数字制造技术与应用教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

3. 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;

4. 南方科技大学 机械与能源工程系, 广东 深圳 518005)

摘要:磁性复合流体(Magnetic Compound Fluid, MCF)抛光是一种高效的精密抛光技术,然而,MCF抛光液在长时间使用过程中存在性能衰减问题。本文研究了MCF抛光液的组分对抛光性能的影响,并探讨了通过添加补充溶液恢复其抛光性能的可行性,以延长MCF抛光液的使用寿命。首先,采用MCF抛光技术对聚甲基丙烯酸甲酯进行抛光实验。通过观察抛光前后MCF形貌的变化特征,测量表面粗糙度、材料去除率、温度和法向力,分析抛光液在不同抛光时间下的性能。其次,通过每10 min添加包含磨粒溶液或 α -纤维素溶液,探究添加组分对MCF抛光性能的恢复效果和延长MCF抛光液寿命的可行性。最后,对添加补充液状态下的MCF的长时间抛光实验,探究MCF抛光液使用寿命。实验结果表明,MCF抛光液在持续抛光60 min后,抛光液形态由初始的均匀磁簇逐渐转变为碎片状团簇,其表面粗糙度下降率由97.06%降低至65.97%,抛光性能显著衰退。通过补充磨粒溶液和 α -纤维素溶液,可使法向力稳定至6.4 N和7.3 N,表面粗糙度下降率保持在85%以上。进一步研究表明,每10 min补充0.1 mL补充液,可使MCF抛光液的使用寿命从60 min延长至180 min,并维持表面粗糙度 $Ra < 0.05 \mu m$,材料去除率在 $1.80 \times 10^8 \mu m^3/min$ 以上。MCF抛光液在抛光过程中存在水分、磨粒和 α -纤维素的损耗,导致抛光性能下降。通过定量补充关键组分,可有效维持MCF抛光液的抛光性能,提高抛光稳定性,并显著延长其使用寿命。

关键词:磁性复合流体;抛光;表面粗糙度;材料去除率;使用寿命

中图分类号: TG580 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20253312. 1902

CSTR: 32169. 14. OPE. 20253312. 1902

Experimental study on performance stability and service life of magnetic compound fluid

WANG Youliang^{1,2}, YU Puyao^{1*}, GAO Xichun¹, ZHANG Wenjuan³, WU Yongbo⁴

(1. School of Mechanical and Electronical Engineering, Lanzhou University of Technology,
Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Digital Manufacturing Technology and Application, Ministry of Education of
China, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

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

收稿日期: 2024-03-18; **修订日期:** 2024-04-12.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 52265056); 南方科技大学高水平专项资金(G03034K003); 兰州市青年人才项目(No. 2023-QN-38)

4. *Department of Mechanical and Energy Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518005, China)*

* *Corresponding author, E-mail: ypyzb0204@163. com*

Abstract: Magnetic Compound Fluid (MCF) polishing is an efficient precision polishing technology. However, the MCF slurry experiences performance degradation during prolonged use. This study investigated the effects of component loss on the polishing performance of MCF slurry and explored the feasibility of restoring its performance through the addition of supplementary solutions to extend its service life. Firstly, polishing experiments were conducted on polymethyl methacrylate (PMMA) using MCF slurry. Changes in the MCF morphologies before and after polishing were observed, and the surface roughness, material removal rate, temperature, and normal force were measured to analyze the performance variations over time. Additionally, supplementary abrasive particle and α -cellulose solutions were added every 10 minutes to evaluate their effectiveness in restoring the performance of MCF and extending its service life. Finally, long-term polishing experiments were conducted to assess the service life of the MCF slurry under the influence of the supplementary solutions. The results indicate that after 60 minutes of continuous polishing, the MCF slurry morphology changed from uniform magnetic clusters to fragmented clusters. The surface roughness reduction rate decreased from 97.06% to 65.97%, showing significant performance degradation. By adding abrasive particle and α -cellulose solutions, the normal force was stabilized at 6.4 N and 7.3 N, respectively, with the surface roughness reduction rate maintained above 85%. Further investigations demonstrated that adding 0.1 mL of supplementary solution every 10 minutes extended the service life of the MCF slurry from 60 minutes to 180 minutes, while maintaining the surface roughness below $0.05\text{ }\mu\text{m}$ and the material removal rate above $1.80 \times 10^8\text{ }\mu\text{m}^3/\text{min}$. During the polishing process, the MCF slurry undergoes the loss of water, abrasive particles, and α -cellulose, leading to a decline in polishing performance. By quantitatively replenishing these key components, the polishing performance of the MCF slurry can be effectively restored, ensuring improved polishing stability and significantly extending its service life.

Key words: magnetic compound fluid; polishing; surface roughness; material removal rate; service life

1 引 言

随着现代科学技术的迅速发展以及高新技术产业的不断升级,具有超高光滑表面的光学元件在航空航天、信息通信、生物医学、微电子等领域得到广泛应用^[1-2],然而,传统加工方法虽能实现较低的表面粗糙度,但仍存在加工质量不稳定及亚表面损伤等问题^[3-4],难以满足光学元件对超光滑表面与高形状精度的严苛要求。因此,为了确保光学元件的光学性能必须对其进行进一步的精密抛光处理。开发高效、高精度的超精密抛光技术已成为必然需求^[5]。

磁场辅助抛光技术(Magnetic Field-Assisted Polishing, MFAP)是一种柔性抛光方法,利

用外部磁场施加的磁场力来进行抛光的先进表面处理技术^[5]。该方法能够确保抛光工具精确贴合工件表面,且工件所受的抛光压力明显低于传统方法。此外,与其他传统抛光技术相比,磁场辅助抛光能够有效减少表面缺陷,显著提高表面质量,从而更好地保障光学元件的形状精度。磁场辅助抛光通常依赖于磁流体(Magnetic Fluid, MF)、磁流变液(Magnetorheological Finishing, MRF)或磁性复合流体(Magnetic Compound Fluid, MCF)来实现光学元件的精密抛光^[6-7]。MF抛光液在抛光过程中表现出良好的颗粒分散性和较高的流变特性。然而,由于MF中的纳米级磁性粒子饱和磁化强度过低且MF抛光液在磁场作用下的粘度较低,导致其屈

服应力较小,抛光力不足,从而影响了抛光效果并降低了抛光效率^[8-9]。MRF 抛光液是通过在基液中添加磁性颗粒和稳定剂来增强其在磁场中的粘度。然而,MRF 抛光液中的磁性颗粒分布相对不稳定,容易导致磁性颗粒在抛光过程中堆积,使得磨粒难以在工件表面稳定地进行材料去除^[10]。为了克服上述问题,Shimada 等人^[11]提出一种新型磁性流体—MCF。该流体由内含纳米级磁铁矿颗粒的水基磁流体与微米级羰基铁粉(Carbonyl iron powder, CIP)和 α -纤维素机械混合而成。然后将非磁性磨料颗粒(Abrasive particle, AP)以一定比例均匀混入 MCF 即可得到 MCF 抛光液。其在磁场作用下表现出更高的饱和磁化强度和表观粘度,颗粒分布更加均匀稳定,同时保持了良好的流体性能^[12]。

目前,MCF 抛光技术已在多种材料中得到了广泛的研究和应用,包括石英玻璃^[13]、PM-MA^[14]等。Wu 等人^[15]针对 MCF 抛光液工作寿命不够充分的问题,通过对其进行超声雾化补水,成功延长了 MCF 抛光液的使用寿命,并最终获得了表面粗糙度为 R_a 46.3 nm 的氧化铝陶瓷表面。田可等人^[16]则通过优化半球头式抛光头的设计和工艺参数,成功实现了非球面光学元件的 MCF 抛光,最终获得了表面粗糙度为 R_a 1.786 nm 的非球面工件。叶卉^[17]等人使用 MCF 抛光液对 BK7 玻璃进行抛光,分析了材料去除量与磁场强度及抛光时间之间的关系。然而,通过大量实验研究发现,在 MCF 抛光过程中,随着抛光时间的增加,抛光性能持续下降^[18]。为了确保抛光效果,必须频繁更换抛光液,显著降低了加工效率。因此,本文系统性探究了 MCF 抛光过程中抛光液组分的流失对抛光质量的影响,并通过定量添加组分溶液的方法恢复其抛光性能。针对添加不同组分溶液条件下 MCF 抛光液的抛光性能、温度变化及法向力变化进行研究,旨在确保 MCF 抛光液能够在长时间内保持高质量、高效率的抛光性能,从而有效延长其使用寿命,提高整体加工效率。

2 抛光实验

2.1 实验原理

图 1 为 MCF 抛光原理示意图。圆柱状永磁体以偏心距 r 连接在磁铁座的端面上。由铝板制成的 MCF 载液板位于永磁体左侧,并与其保持一定的间隙 δ 。当电机 1 以转速 n_m 驱动磁铁座旋转时,永磁体围绕支架的轴线进行旋转,使磁力线不断围绕磁铁座轴线旋转,并始终保持磁通密度恒定。如图 1(左侧)所示,当工件与载体之间的间隙 Δ 中填充一定体积的 MCF 抛光液时,在外加磁场的作用下,纳米级磁性颗粒与微米级羰基铁颗粒会沿磁力线方向分布并形成链状结构,与 α -纤维素交织在一起,从而增强 MCF 抛光液的抗剪切能力^[19]。非磁性磨粒被磁悬浮力驱动向工件表面聚集^[20-21]。当电机 2 以转速 n_c 带动载液板旋转时,MCF 抛光液中的磨料颗粒在磁场作用下与工件表面产生微切削作用,从而实现工件表面的材料去除^[22]。

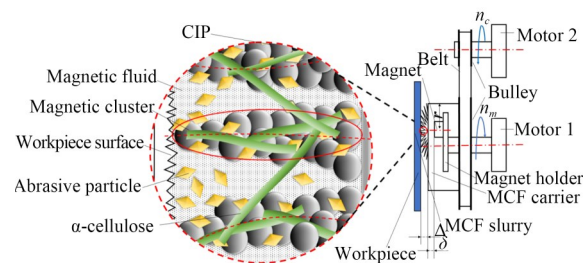


图 1 MCF 抛光原理示意图

Fig. 1 Digital photo and XRD of nickel slag

2.2 实验装置

基于上述 MCF 抛光原理,搭建了如图 2 所示的实验装置。该装置主要由三轴移动平台、电机控制器、柱状永磁铁、红外热成像仪、磁铁座、同步带轮以及铝制载液板组成。为减少永磁铁对周围零部件磁化后对空间磁场的干扰,抛光装置的主体零部件均选用铝合金材料制成。

MCF 载液板安装在三轴移动平台的 Y 轴上(重复定位精度为 $1\text{ }\mu\text{m}$),通过控制 Y 轴的移动来调整 MCF 抛光液与工件之间的加工间隙。电机控制器则用于控制载液板和磁场的旋转方向及转速。工件固定在 Z 轴

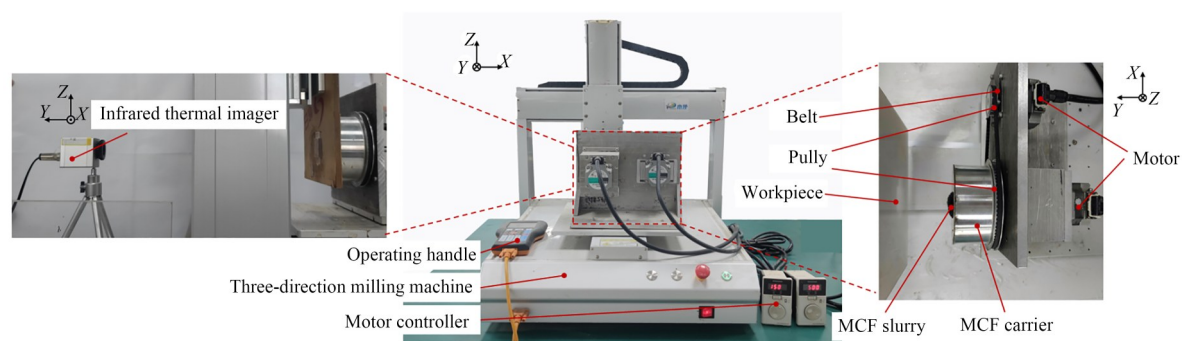


图2 MCF 抛光装置

Fig. 2 Polishing device of MCF polishing process

上,通过调节三轴移动平台的 X 轴与 Z 轴位置,可以精确确定工件与MCF抛光液的空间位置。

2.3 实验条件

实验参数如表1所示。实验采用初始表面粗糙度在 R_a 0.5~0.6 μm 之间的PMMA板(尺寸:

L 70 mm $\times$ W 70 mm $\times$ T 1 mm)作为工件。为确保工件表面初始粗糙度均匀,抛光前使用800目砂纸沿同一方向进行预处理打磨,随后采用超声波清洗除去表面残留物,最后使用压缩空气快速干燥。依据先前研究^[23],MCF抛光液的具体组成及配比如表2所示。

表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

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

表 2 MCF 抛光液成分

Tab. 2 Component of MCF slurry

	Water-based magnetic fluid (MF)	Carbonyl iron powder (CIP)	Abrasive grain (Al_2O_3)	α -cellulose
Mean diameter	10 nm	7 μm	1 μm	
Concentration	45 wt. %	40 wt. %	12 wt. %	3 wt. %

如图3所示,为探究MCF抛光液的使用寿命及抛光性能,使用上述参数所制备的抛光液,对6个PMMA工件分别抛光 $\Delta t=10$ min,使MCF抛光液总计持续抛光60 min,并通过触针

表面粗糙度测试仪(SJ-410,三丰精密量仪有限公司)记录各工件抛光前后的表面粗糙度及表面轮廓。

使用工业相机(HD205,奥斯微)观察并记录

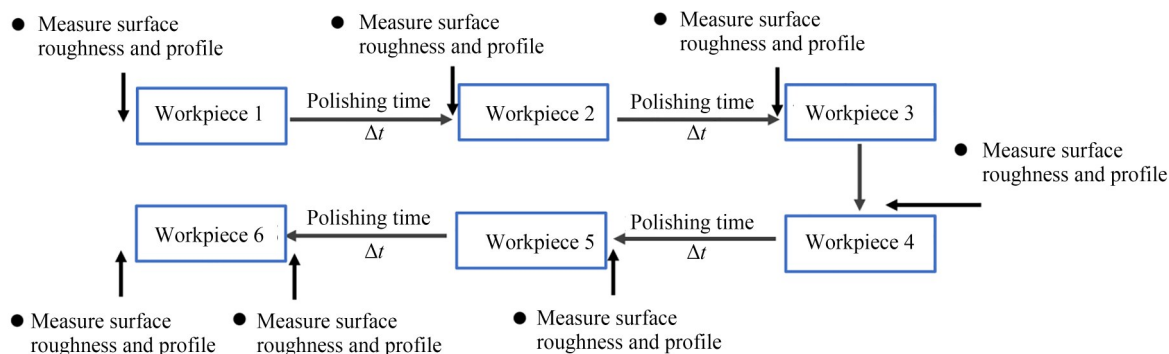


图 3 实验过程示意图

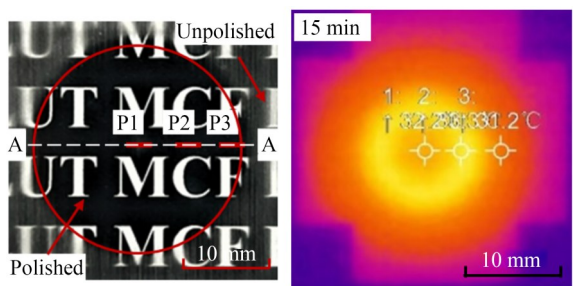
Fig. 3 Experimental process

MCF 抛光液抛光前后的形貌特征,探究 MCF 抛光液状态的变化规律;使用红外测温计(PI450, 欧普士)测量抛光过程中温度变化;使用三向力测量仪(9257B, 奇石乐)测量抛光过程中 MCF 的法向力,探究抛光液状态和温升、法向力之间的内在联系。

3 结果与讨论

3.1 MCF 抛光性能

图 4(a)为 MCF 抛光区域的测量点示意图。对图 4(a)中工件抛光前后 A-A 截面的轮廓曲线进行测量,基于工件表面轮廓曲线的数据样点,通过积分累加计算各数据点的变化量,最终得到抛光时间内工件整体的体积减小量,从而计算出材料去除率。图 4(b)为图 4(a)中对应区域的温度。



(a) 抛光区域 (a) Polishing area (b) 测温区域 (b) Temperature measurement area

图 4 抛光区域的测量点及红外温度测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement points and infra-red temperature measurement in the polishing area

为了表征抛光区域的表面粗糙度和温度的变化,分别测量并记录抛光区域内不同位置(P1, P2, P3)的表面粗糙度和温度,并取其平均值作为最终的表面粗糙度和温度测量结果。鉴于工件的初始表面粗糙度存在细微差异,本文定义了表面粗糙度下降率 $R_a\%$ 来评价 MCF 的抛光效果,公式如式(1)所示:

$$R_a\% = (1 - R_{ap}/R_{ai}) \times 100\% \quad (1)$$

图 5 显示了 MCF 抛光液外观形态、工件表面粗糙度、表面粗糙度下降率和材料去除率随时间的变化。初始状态下, MCF 抛光液中磁团簇分布均匀,呈针尖状,内部夹杂大量活性磨粒。经过 10 min 的抛光后,抛光液中心的针尖状磁团簇逐渐转变为微小的片状结构。随着抛光时间的增加,这些片状结构逐步由中心向外围扩散,在

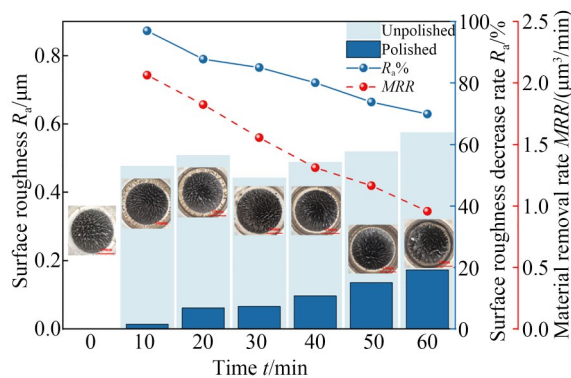


图 5 MCF 形态、表面粗糙度、下降率和材料去除率随抛光时间的变化

Fig. 5 Changes in MCF morphologies, surface roughness, decrease rate, and material removal rate with polishing time

抛光 60 min 后,粘连形成较大的片状或块状团簇。

在持续抛光 60 min 的过程中,MCF 抛光液的抛光性能逐渐下降,表现为表面粗糙度下降率和材料去除率均呈现下降趋势。在抛光初期 10 min 内,工件表面粗糙度下降率达 97.06%,材料去除率为 $2.088 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$ 。随着抛光时间延长,抛光性能逐渐下降;在 50~60 min 阶段,表面粗糙度下降率降至 65.97%,材料去除率降至 $0.98 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$ 。由此可见,MCF 抛

光液经过 60 min 持续抛光后,抛光性能显著衰退。

磨粒在材料去除过程中产生热量,会使得 MCF 抛光液温度升高,进而加剧水分损耗,导致抛光液形貌的改变。图 6(a)为抛光液温度变化,可以看出抛光过程中抛光液温度持续上升。因此,水分流失随抛光时间增加而加剧,形成温升与水分流失的正反馈效应。这一过程加速了抛光液性能恶化,导致其抛光效果持续下降并加快失效。

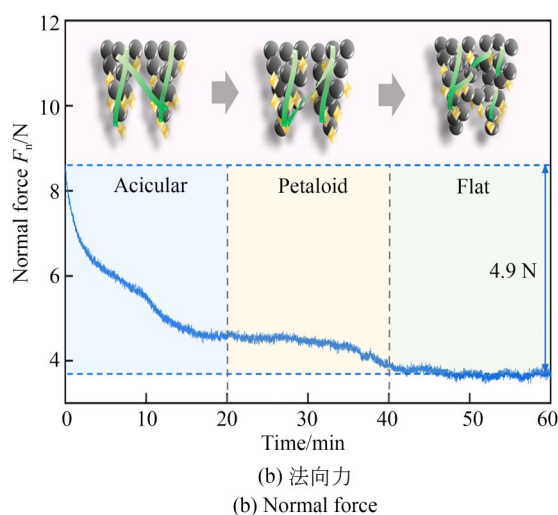
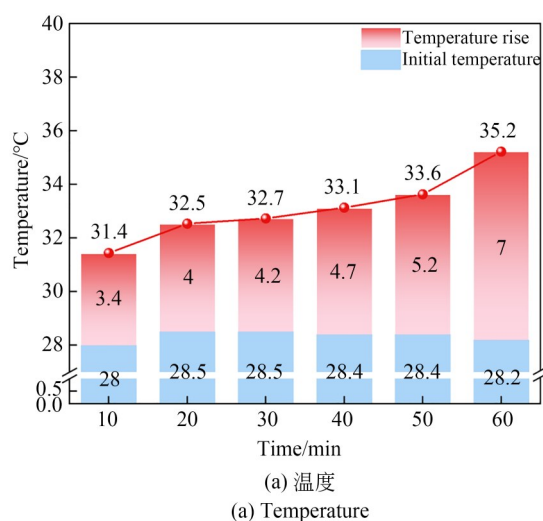


图 6 MCF 抛光液的温度、法向力随着时间变化

Fig. 6 Changes in the temperature and normal force of MCF with time

抛光过程中 MCF 抛光液的法向力随加工时间的变化如图 6(b)所示。结果表明,法向力随时间的增加持续下降,从初始的 8.6 N 降至约 3.7 N,无法长时间保持稳定。在加工过程中,由于抛光液水分的大量流失,MCF 抛光液的固体浓度逐渐增加,流动性显著降低。这种变化导致抛光液内的磁性链状结构恢复能力下降,无法恢复至原有链长,从而引起法向力的持续下降。

3.2 磨粒和 α -纤维素对抛光性能的影响

为观察抛光前后 MCF 抛光液中磨粒的粒径变化,将抛光后的抛光液与磨粒分离,使用随机选取部分磨粒进行观察和分析,如图 7

(a)和图 7(b)所示。抛光后的磨粒出现部分微小碎状结构,并伴随磨粒钝化现象。统计不同抛光时间下磨粒的平均粒径分布,如图 7(c)~7(f)所示。结果表明,初始磨粒的平均粒径为 $3.08 \mu\text{m}$,最终在 60 min 时平均粒径减小至 $2.69 \mu\text{m}$ 。图 7(g)显示了磨粒平均粒径随抛光时间的变化。从图中可见,磨粒粒径随着抛光时间增加逐渐减小。在前 20 min 内,粒径明显下降,初期磨粒较为锋利,导致切削刃快速磨损,磨粒逐渐钝化,粒径迅速减小。抛光 20 min 后,粒径下降趋势开始变缓。此时,切削刃逐渐磨平,导致磨粒的抛光能力在不断下降,磨粒的磨损减小,粒径变化趋于

平缓。

图 8(a)和图 8(b)展示了 α -纤维素在抛光前后的形貌变化。抛光前, α -纤维素长度较长且分布均匀, 对磁簇起到良好的支撑与连接作用; 抛光后, 由于其损耗显著, 长度明显缩短, 导致 MCF 抛光液抗剪切能力下降。图 8(c)~图 8(f) 为不同抛光时间下 α -纤维素的长度分布情况。初始平均长度为 $446.44 \mu\text{m}$, 经过 20 min 的抛光后, 长度降至 $252.14 \mu\text{m}$; 40 min 时进一步减少至 $179.34 \mu\text{m}$; 至 60 min 时, 长度最终缩短至

$140.61 \mu\text{m}$ 。图 8(g)为 α -纤维素长度随抛光时间的变化曲线。随着 MCF 抛光时间的延长, α -纤维素的平均长度逐渐减小。在抛光初期, α -纤维素的平均长度迅速减小, α -纤维素作为抗剪切关键成分被大量消耗。至 40 min 时, α -纤维素的消耗速度显著放缓, 这是由于长度缩短后, 其抗剪切能力减弱, 削弱了继续消耗的动力。抛光至 60 min 后, α -纤维素长度仅为初始的四分之一, 其抗剪切作用几乎丧失, 无法继续支持抛光液继续进行抛光。

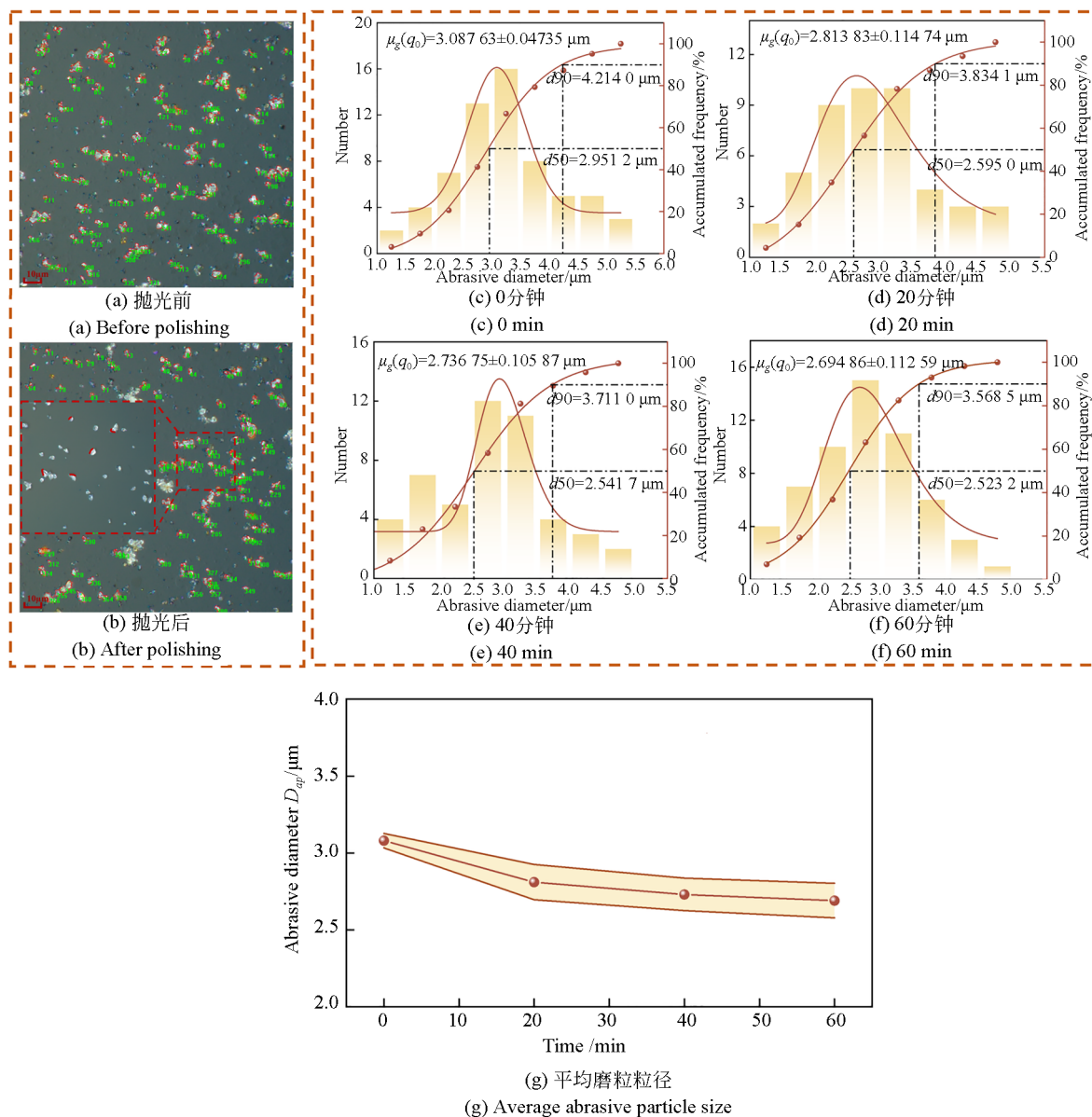
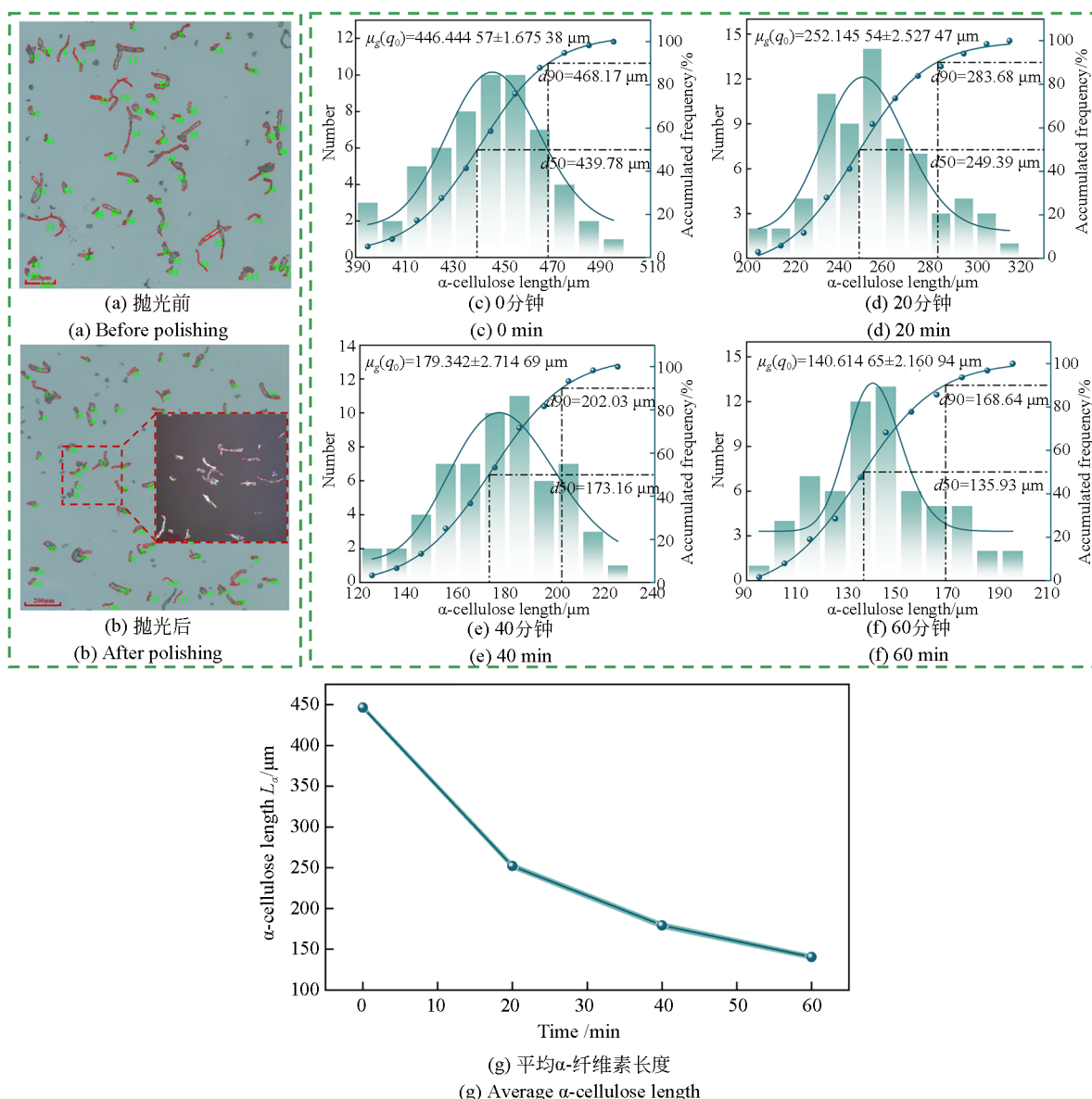


图 7 抛光前后磨粒分布图像和不同时间磨粒粒径大小

Fig. 7 Distribution images of abrasive particles before and after polishing and particle size at different times

图 8 抛光前后 α -纤维素分布图像和不同时间 α -纤维素长度Fig. 8 Distribution images of α -cellulose before and after polishing and α -cellulose lengths at different times

3.3 添加组分溶液的 MCF 抛光性能

上述实验研究了 MCF 抛光过程中磨粒大小和 α -纤维素长度的变化及其作用规律。MCF 抛光液抛光 60 min 后,其整体质量减少了 0.637 g。因此,每 10 min 分别向两组 MCF 抛光液添加 0.1 mL 的以去离子水为基液的溶液^[24]。一组为磨粒质量分数为 12 wt. % 的磨粒溶液,另一组为 3 wt. % α -纤维素溶液,并更换下一个工件,待其持续抛光达 60 min 后,探究其整体抛光性能。

如图 9 所示,尽管添加磨粒溶液和 α -纤维素溶液后的 MCF 抛光液在整体上仍呈现材料去除

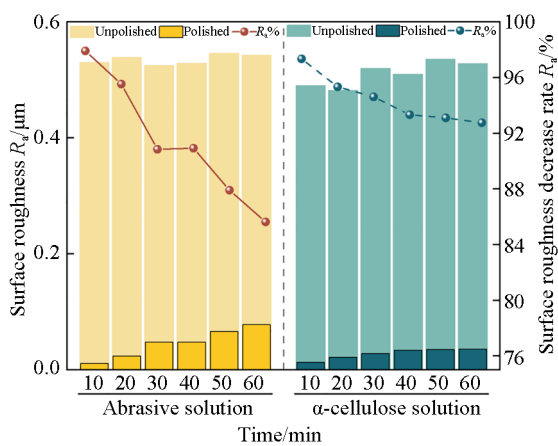
率和表面粗糙度下降率的降低趋势,但均表现出较优的抛光性能。与添加磨粒溶液相比, α -纤维素溶液有助于抛光性能的长期稳定维持。抛光至 20 min 时,添加磨粒溶液的 MCF 抛光液表现出较高的材料去除能力,但随着时间延长,其性能逐渐下降。初期磨粒尚未显著磨损,而 20 min 后需持续补充磨粒和水分以维持去除能力。然而,磨粒浓度过高可能对工件表面造成损伤,导致粗糙度下降率降低。相比之下, α -纤维素溶液通过维持磁簇结构稳定,增强其抗剪切能力,使其在抛光 20 min 后表现出更优的抛光效果。尽

管抛光至 30 min 时整体抛光质量下降,但 α -纤维素的持续补充使抛光液形貌保持相对稳定,从而维持较好的抛光性能。

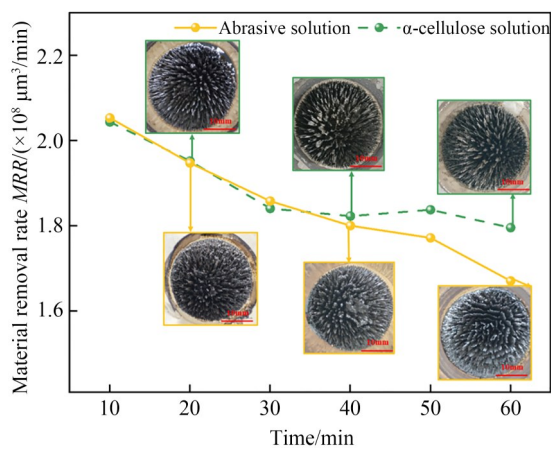
图 9(b) 显示了添加磨粒溶液状态下 MCF 抛光液形貌随抛光时间的变化。初始状态下,抛光液磁簇分散均匀,呈针尖状,具有优异的抛光性能。然而,抛光过程中由于组分损耗,温度升高和水分流失,抛光液逐渐干燥。当抛光时间达到 20 min 时,抛光液中开始出现部分磨粒堆积。第 40 min 时,磨粒堆积明显,这是由于磨粒溶液持

续加入导致其在磁团簇中聚集,影响均匀分散,进而削弱抛光性能。此外,磨粒增多使抛光产生更多热量,加速了抛光液的干燥。在 60 min 时,抛光液形貌更为干燥,导致后续抛光性能下降。抛光至 20 min 时, α -纤维素溶液的添加有效恢复了磁簇结构。然而,持续抛光 30~40 min,由于组分损失,抛光液逐渐干燥,磁簇由粗壮分散结构转变为细小分支,并伴随部分粘连,削弱了抛光性能。但在抛光后期,随着 α -纤维素溶液的持续添加,磁簇结构趋于稳定,呈针状形态,从而维持了较好的抛光效果。

图 10(a) 显示了添加磨粒和 α -纤维素溶液状态下 MCF 抛光液的抛光温度随时间的变化。相比添加磨粒溶液,添加 α -纤维素溶液的抛光液温度变化更为平缓。抛光至 30 min 内,由于 α -纤维素溶液的添加,MCF 的抛光性能相较于添加磨粒的更为优异,产生更多热量,导致其最大温度高于添加磨粒溶液状态。然而,30 min 后,添加磨粒溶液的抛光液因磨粒增加,切削过程产生更



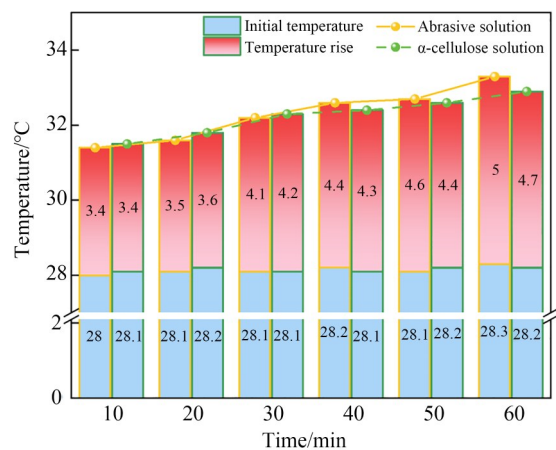
(a) 表面粗糙度和下降率
(a) Surface roughness and decrease rate



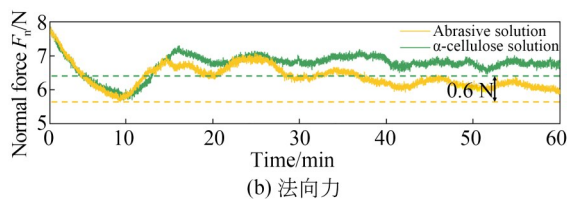
(b) 抛光液形貌和材料去除率
(b) MCF morphologies and material removal rate

图 9 添加溶液后的表面粗糙度、下降率、材料去除率和抛光液形貌随抛光时间的变化

Fig. 9 Changes in surface roughness, decrease rate, material removal rate, and MCF morphologies with polishing time after adding solution



(a) 温度
(a) Temperature



(b) 法向力
(b) Normal force

图 10 添加溶液的 MCF 抛光温度和力变化图

Fig. 10 Changes in the temperature and normal force of MCF with time added solution

多热量,最大温度更高,加速抛光液干燥。添加 α -纤维素溶液的抛光液温度变化较平稳,有效减缓了温升引起的组分流失,抛光性能更为稳定。因此,持续抛光至 60 min 时,添加 α -纤维素溶液的 MCF 抛光性能优于添加磨粒溶液状态。

图 10(b)展示了添加磨粒溶液和 α -纤维素溶液状态下 MCF 抛光液的法向力随时间的变化趋势。初期,MCF 抛光液的抛光性能最佳,但组分损耗较快,导致法向力迅速下降。补充磨粒和 α -纤维素后,有效弥补了损失的成分,使法向力回升。添加磨粒溶液的 MCF 法向力整体呈下降趋势,但最终稳定在约 6.1 N。添加 α -纤维素溶液的 MCF 法向力整体较为平稳,最终维持在约 6.7 N。通过对比可以看出, α -纤维素对法向力和性能影响更为关键。因此,添加 α -纤维素溶液的 MCF 抛光液在抛光过程中表现出更优异的稳定性和抛光性能。

经前期研究和上述实验分析,证实了 MCF 抛光液在抛光过程中会出现水分、磨粒和 α -纤维素的损耗,导致抛光质量持续下降。此外,研究验证了通过补充关键组分可以有效延长 MCF 抛光液使用寿命的可行性。为进一步稳定抛光质量并延长 MCF 抛光液的工作时间,需深入探究添加补充液后的抛光性能,并与初始状态下未添加补充液的性能进行对比,以探究组分补充对抛光性能恢复的具体影响。其详细参数如表 3 所示。

表 3 补充液成分

Tab. 3 Supplement liquid components

Component	Concentration(wt. %)
Abrasive particles	12
α -cellulose	3
Deionized Water	85

图 11(a)展示了添加补充液对 MCF 抛光液性能的影响。可以观察到,在补充组分的条件下,MCF 抛光液在长时间抛光过程中形貌保持较为稳定。如图 11(b)所示,抛光前 20 min,磁簇结构未见明显变化,仍保持粗壮形态,展现出优秀的抛光性能。至 40 min 时,磁簇仍为针状,但出现轻微干燥迹象,表明成分开始流失,抛光质量下降。至 40 min,部分磁簇粘连并团聚,导致

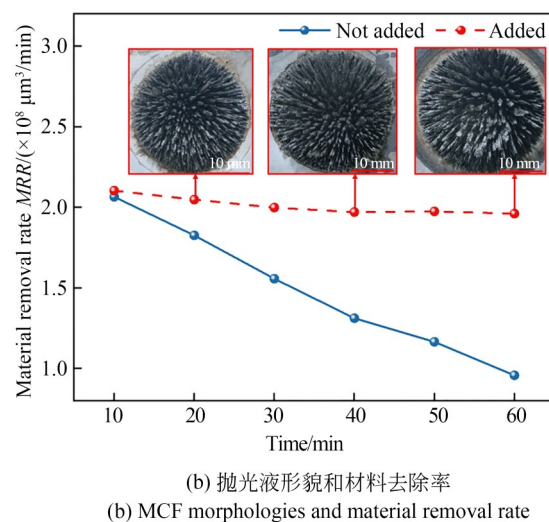
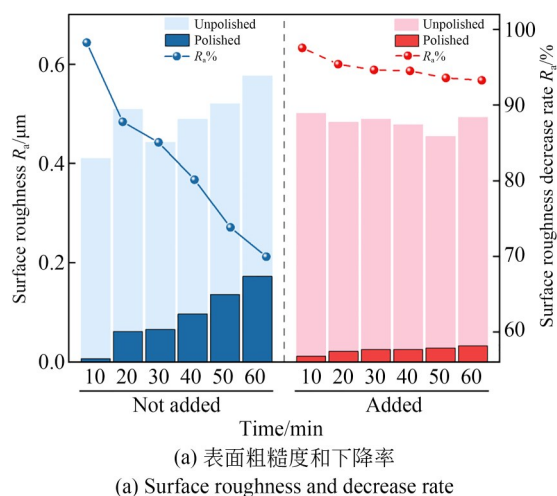


图 11 添加补充液后的表面粗糙度、下降率、材料去除率和抛光液形貌随抛光时间的变化

Fig. 11 Changes in surface roughness, decrease rate, material removal rate, and MCF morphologies with polishing time after adding supplementary solution

后期抛光质量下降。因此,补充组分的 MCF 抛光液能长时间维持稳定的磁簇状态。

未添加的 MCF 抛光液在抛光过程中性能显著下降,60 min 后表面粗糙度下降率从初始的 98.29% 减少至 69.97%,下降 28.32%。相比之下,添加补充液的 MCF 抛光液下降率仅减少 4.3%,在抛光结束时比未添加的提升了 23.33%,显著增强了抛光性能。如图 11(b),60 min 时添加组分的 MCF 抛光液材料去除率达到了 $1.96 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$,是未添加状态下的两倍多。这表明补充液可有效维持 MCF 抛光的加工

性能并延长其使用寿命。可以看出,在添加补充液状态下,MCF 抛光液在长时间抛光过程中形态较为稳定,其形态保持时间更长。

图 12 显示了有无添加补充液时 MCF 法向力的变化。未添加的 MCF 法向力随着抛光时间的增加持续下降;而添加补充液后,法向力可稳定恢复至 7.3 N 左右,接近初始水平,是未添加补充液的 1.97 倍,整体下降趋势缓慢。添加补充液后,抛光液中损耗的 α -纤维素得到补充,增强了磁簇的粘弹性,提高抗剪切能力;磨料颗粒更新,增强了微切削能力;水分的补充,改善了流动性和颗粒分散性。综合作用下,抛光液性能得以快速恢复并保持在较高水平。

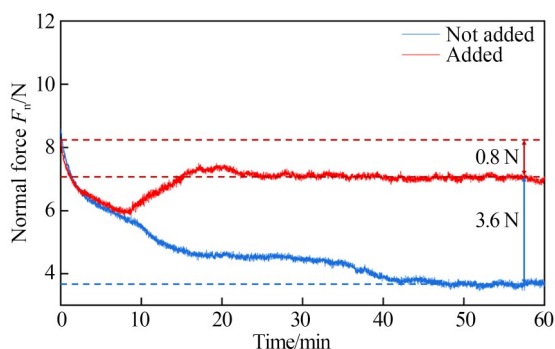


图 12 有无添加补充液状态下 MCF 法向力随时间变化
Fig. 12 Changes in MCF normal force with and without the addition of supplementary solution

4 MCF 抛光液使用寿命

图 13 显示了抛光液长时间工作的表面粗糙度与材料去除率的变化。结果表明,通过每隔 10 min 补充 0.1 mL 补充液,可使 MCF 抛光液在 180 min 内维持表面粗糙度在 $0.05 \mu\text{m}$ 以下,材料去除率可以保持在 $1.80 \times 10^8 \mu\text{m}^3/\text{min}$ 。抛光性能变化可分为四个阶段:第一阶段(0~80 min),表面粗糙度与材料去除率变化平稳,性能稳定;第二阶段(80~140 min),性能迅速下降,波动加剧,可能由于成分饱和,载液板高速旋转导致 MCF 流失;第三阶段(140~180 min),性能恢复稳定但抛光质量较低;第四阶段(180 min 后),性能衰减明显,表面粗糙度大幅升高。实验表明,随着时间的增加,性能稳定期逐渐缩短。因此,通过在抛光过程中添加补充液,可以使 MCF

抛光液保持 180 min 的长时间使用。

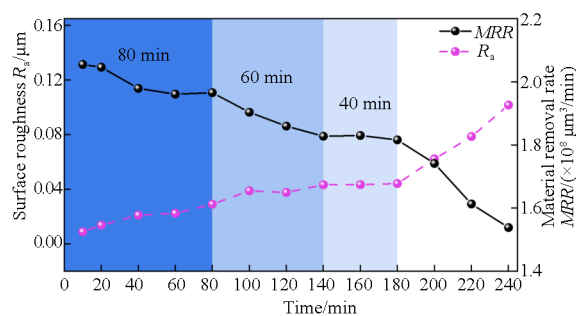


图 13 MCF 抛光液长时间抛光的表面粗糙度和材料去除率

Fig. 13 Surface roughness and material removal rate of MCF after long-term polishing

图 14 显示了 MCF 抛光液长时间抛光过程中温度随时间的变化情况。结果表明,添加补充液状态下的 MCF 抛光液升温较为稳定,其最高温度也得到有效控制。这是由于补充液中的水分能够吸收抛光过程中产生的热量,促进热量均匀散失,从而缓解温度上升趋势。温度的稳定性不仅降低了抛光液中组分的消耗与流失速度,还优化了抛光液的工作状态,显著延长了其使用寿命。

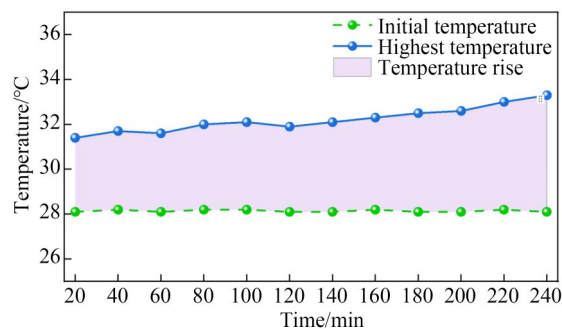


图 14 MCF 抛光液长时间抛光温度变化

Fig. 14 Temperature changes of MCF during long-term polishing

综上所述,添加补充液显著延长了 MCF 抛光液的使用寿命和抛光性能。其作用机制主要包括:通过补充水分降低颗粒浓度,提高颗粒分散性,减少磨粒团聚现象,使磨粒均匀分布并高效参与切削;补充新磨粒替代钝化磨粒,增强切削能力,改善工件表面质量;补充液中的 α -纤维

素补充了损失的纤维素,稳定剪切能力;同时,MCF抛光液形貌的恢复确保了磨粒更新和磁簇结构稳定。上述多重机制共同作用,使MCF抛光液具备长时间抛光能力,并显著提高其抛光持久性和效率。

5 结 论

本文通过研究MCF抛光液在抛光前后形貌的变化特征,结合抛光过程中的温度和法向力变化规律,分析了抛光液各组分的损耗过程及其对抛光性能的影响,并通过添加补充液,实现了MCF抛光液性能的恢复和使用寿命的延长。主要总结如下:

(1) 抛光过程中,MCF抛光液组分随着时间大量损耗,显著影响其抛光性能。在连续抛光60 min内,法向力从初始的8.6 N降至3.7 N,抛光后工件表面粗糙度从 R_a 0.014 μm 升高至 R_a 0.196 μm ,表面粗糙度下降率从97.06%降至

65.97%,抛光质量显著下降。

(2) 添加组分溶液可部分恢复MCF抛光液的工作性能。其中,添加 α -纤维素溶液的效果最佳,法向力可稳定在7.3 N;添加磨粒溶液后法向力稳定在6.4 N。

(3) 在MCF抛光过程中,每10 min添加0.1 mL以去离子水为基础液制备的补充液,可在180 min内保持抛光性能的稳定,表现出优异的抛光效果,有效延长了MCF的使用寿命。此外,开发更高效的补充液添加机制或自动化系统,能够实现精确、连续的补充液控制,以提升抛光过程的稳定性和效率。

作者贡献声明:

王有良:论文构思和审核与编辑;
于璞垚:初稿写作,调查研究和数据管理
高熙淳:形式分析和验证;
张文娟:方法论和提供资源;
吴勇波:指导。

参考文献:

- [1] 李涛,黄惟琦,龙归,等.单晶硅的激光抛光表面形貌演化[J].机械工程学报,2023,59(21): 52-64.
LI T, HUANG W Q, LONG G, *et al.* Surface topography evolution of single crystal silicon in laser polishing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(21): 52-64. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 袁巨龙,张飞虎,戴一帆,等.超精密加工领域科学技术发展研究[J].机械工程学报,2010,46(15): 161-177.
YUAN J L, ZHANG F H, DAI Y F, *et al.* Development research of science and technologies in ultra-precision machining field [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(15): 161-177. (in Chinese)
- [4] WANG C J, LOH Y M, CHEUNG C F, *et al.* Magnetic field-assisted batch superfinishing on thin-walled components [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 223: 107279.
- [5] 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.
- [6] LE T D, AHN K K. A vibration isolation system in low frequency excitation region using negative stiffness structure for vehicle seat [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330(26): 6311-6335.
- [7] PAN J, ZHENG G L, ZHU D Q, *et al.* Utilization of nickel slag using selective reduction followed by magnetic separation [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(11): 3421-3427.
- [8] TANI Y, KAWATA K, NAKAYAMA K. Development of high-efficient fine finishing process using magnetic fluid [J]. *CIRP Annals*, 1984, 33(1): 217-220.
- [9] UMEHARA N, HAYASHI T, KATO K. *In situ* observation of the behavior of abrasives in magnetic fluid grinding [J]. *Journal of Magnetism and Mag-*

- netic Materials*, 1995, 149(1/2): 181-184.
- [10] PROKHOROV I V, KORDONSKY W I, GLEB L K, *et al.* New high-precision magnetorheological instrument-based method of polishing optics [C]. *Optical Fabrication and Testing Workshop*. Boston, Massachusetts. Optica Publishing Group, 1992.
- [11] 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.
- [12] SHIMADA K, WU Y, MATSUO Y, *et al.* Float polishing technique using new tool consisting of micro magnetic clusters [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 162: 690-695.
- [13] 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)
- [14] GUO H R, WU Y B, LI Y G, *et al.* Technical performance of zirconia-coated carbonyl-iron-particles based magnetic compound fluid slurry in ultra-fine polishing of PMMA [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 523: 161-166.
- [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] 田可, 郭会茹, 吴勇波, 等. 旋转磁场下非球面工件的磁性混合流体抛光 [J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2022, 42(4): 495-503.
- TIAN K, GUO H R, WU Y B, *et al.* Magnetic compound fluid polishing of aspheric workpiece under rotating magnetic field [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2022, 42(4): 495-503. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 王有良, 史小锋, 陈秀娟, 等. 基于双磁场磁性复合流体的抛光性能 [J]. *表面技术*, 2022, 51 (11): 360-372.
- WANG Y L, SHI X F, CHEN X J, *et al.* Polishing performance of magnetic compound fluid based on double magnetic field [J]. *Surface Technology*, 2022, 51(11): 360-372. (in Chinese)
- [21] FENG M, WU Y B, WANG Y L, *et al.* Investigation on the polishing of aspheric surfaces with a doughnut-shaped magnetic compound fluid (MCF) tool using an industrial robot [J]. *Precision Engineering*, 2020, 61: 182-193.
- [22] 郭源帆, 尹韶辉, 黄帅. Halbach 阵列与不同励磁方式的磁流变抛光特性及机理研究 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59(15): 341-353.
- GUO Y F, YIN S H, HUANG S. Study on machining characteristic and its mechanism of magnetorheological polishing with halbach array and other excitation modes [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(15): 341-353. (in Chinese)
- [23] WANG Y L, GAO X C, GAO J B, *et al.* A novel polishing method for extending the service life of magnetic compound fluid [J]. *Lubricants*, 2022, 10 (11): 299.
- [24] 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)

- [25] 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.

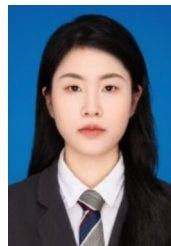
WANG Y L, GAO X C, ZHANG W J, *et al.* Influence of water in magnetic compound fluid on polishing performance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(24): 3559-3569. (in Chinese)

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

通讯作者:



于璞垚(2000—),女,陕西西安人,硕士研究生,2021年于西安石油大学大学获得学士学位,主要从事磁场辅助抛光的研究。E-mail: ypyzb0204@163.com