

微槽的超声振动辅助磁性复合流体抛光工艺研究

魏久翔, 姜晨, 刘剑

(上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对微通道制氢反应器的微槽底部光整加工难题, 开展超声振动辅助磁性复合流体 (UMCF) 抛光工艺研究。根据表面接触理论分析微槽底部气膜对磁性复合流体 (MCF) 抛光的影响, 引入超声振动改善 MCF 抛光微槽底部的表面质量; 通过试验探究 UMCF 抛光对微槽底部的抛光效果; 研究不同参数下 MCF 抛光和 UMCF 抛光对微槽的表面形貌、表面粗糙度和去除率的变化规律, 获得最佳的抛光参数。研究表明: 当羰基铁粉粒径为 $48\text{ }\mu\text{m}$, 抛光时间为 5 min , 抛光轮转速为 500 r/min , 抛光间隙为 2 mm , 振幅为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时抛光效果最佳, 微槽顶部表面粗糙度 Ra 达到 $0.217\text{ }\mu\text{m}$; 槽底表面粗糙度 Ra 达到 $0.403\text{ }\mu\text{m}$, 去除率为 4.74 mg/min 。

关键词: 超声振动; 磁性复合流体; 抛光; 微槽结构; 工艺参数

中图分类号: TG 580

文献标志码: A

Ultrasonic vibration-assisted magnetic compound fluid polishing of microgrooves

WEI Jiuxiang, JIANG Chen, LIU Jian

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

Abstract: For the technical problem of microgroove bottom finishing in microchannel hydrogen production reactor, ultrasonic vibration assisted magnetic composite fluid (UMCF) polishing technology were carried out. According to the surface contact theory, the influence of gas film at the bottom of the microgrooves on the magnetic composite fluid (MCF) polishing was analyzed, and the surface quality of the bottom of the microgrooves was improved by introducing ultrasonic vibration. The effect of UMCF polishing on the bottom of microgrooves was investigated by experiments. The effects of MCF and UMCF polishing on the surface morphology, surface roughness and removal rate of the microgrooves under different parameters were obtained. The results show that at the particle size of carbonyl iron powder of $48\text{ }\mu\text{m}$, polishing time of 5 min , polishing wheel speed of 500 r/min , polishing gap of 2 mm and amplitude of $5\text{ }\mu\text{m}$, the polishing effect is the best. The top surface roughness of the microgrooves reaches $0.217\text{ }\mu\text{m}$. The bottom surface roughness reaches $0.403\text{ }\mu\text{m}$, and the removal rate is 4.74 mg/min . Experimental results provide guidance for ultrasonic vibration-assisted magnetic composite fluid polishing of microgroove structure parts.

收稿日期: 2021-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51475310)

第一作者: 魏久翔 (1996-), 男, 硕士研究生。研究方向: 精密加工技术。E-mail: wei_jiuxiang@126.com

通信作者: 姜晨 (1978-), 男, 教授。研究方向: 精密加工及检测技术。E-mail: jc_bati@163.com

Keywords: *ultrasonic vibration; magnetic compound fluid; polishing; microgroove structure; process parameters*

微槽结构作为微型元器件中常见的结构，在微电子、生物医学及航空航天等领域得到广泛使用^[1]。对于微尺寸零件，由于表面粗糙度而产生的摩擦力影响更为显著^[2]。对于微流控元器件，表面粗糙度会直接影响流体的流动性^[3]。微槽型通道反应器是氢燃料电池制氢系统的核心元件之一^[4]，微槽底部的表面质量和精度影响了反应器中流体的流动稳定性。高质量的微槽能够有效地延长燃料电池寿命，提高电池输出功率。然而，传统的抛光方式存在加工效率低、加工过程不可控以及容易产生表面损伤等缺点。因此，迫切需要一种能够针对提高微槽表面质量的新型高效光整加工技术。

如今面向微结构工件的抛光技术研究在不断深入。Jang 等^[5]利用激光微量抛光技术对 316L 型不锈钢的 2 个不同形状表面进行抛光；对于倾斜或弯曲的表面，分别使得表面粗糙度降低了 56.4% 和 57.3%。Tsai 等^[6]利用磨料水射流抛光对 SKD61 型模具钢微槽结构进行抛光处理，使表面粗糙度 Ra 从 $0.24\text{ }\mu\text{m}$ 下降到 $0.06\text{ }\mu\text{m}$ 。Guo 等^[7]采用磁场辅助光整加工方法对微流控芯片中的铝合金弯曲微结构模具进行抛光，表面粗糙度从 $0.37\text{ }\mu\text{m}$ 下降到 $0.11\text{ }\mu\text{m}$ 。

MCF(magnetic compound fluid)抛光最早由 Shimada 等^[8]提出。MCF 结合了磁流变液 (magnetorheological fluid, MRF) 和磁流体 (magnetic fluid, MF) 的优点^[9]，具有抛光液粘度可保持连续、无级变化，加工过程高效可控，对元件表面和亚表面几乎无损伤的优势^[10]。由于 MCF 抛光液粘度可控的特点，适合对微槽进行光整加工。此外，通过引入超声振动进一步改善微槽底部的抛光效果。

超声振动能够提高加工性能，目前被广泛应用于辅助加工过程^[11-12]。与其他抛光方式相比，UMCF(ultrasonic-vibration-assisted magnetic compound fluid)抛光作为一种较为新颖的超精密加工技术，具有切削力小、切削热低、加工稳定、加工效率高、能够适应各类复杂表面的特点^[13]。作为一项新型光学精密加工技术，国内对于 UMCF 抛光的研究较少。

本文根据表面接触理论分析 UMCF 抛光的改善作用，通过试验探究 UMCF 抛光加工微槽底部

的抛光效果；进而研究不同参数下 MCF 抛光和 UMCF 抛光对微槽的表面形貌、去除率和表面粗糙度的变化规律，获得最佳抛光参数。

1 超声振动辅助磁性复合流体抛光原理

MCF 抛光过程中，带有磨粒的抛光液在动态磁场作用下形成柔性抛光膜，随着抛光轮的转动对工件进行微铣削去除^[14]。试验中的抛光液成分包括微纳米级碳基铁粉、 α -纤维素、氧化铝抛光粉和去离子水。UMCF 抛光原理如图 1 所示。UMCF 抛光加工示意图如图 2 所示。

图 1 为 UMCF 抛光基本原理。在外加磁场的作用下，MCF 中的磁性颗粒迅速从自由状态转变为沿磁力线方向的链状结构，形成柔性抛光膜。氧化铝抛光颗粒在纤维素的作用下悬浮在抛光膜最外层，随着抛光轮转动对表面形成切削作用。抛光颗粒在超声振动的影响下动能增加，抛光均匀性得到显著改善。

根据表面接触基础理论的 Cassie 模型，对

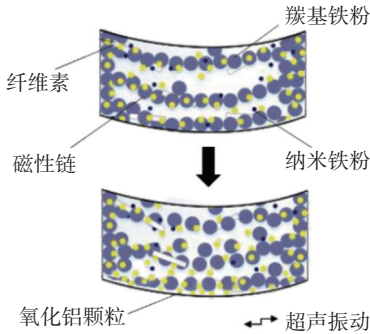


图 1 UMCF 抛光原理

Fig. 1 Measurement method of UMCF polishing

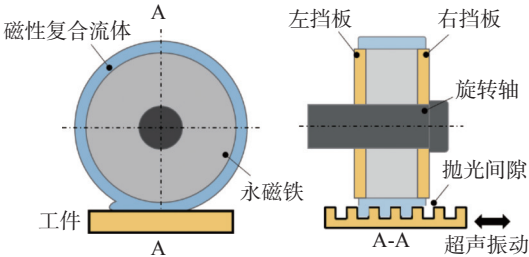


图 2 UMCF 抛光加工示意图

Fig. 2 Diagram of UMCF polishing

UMCF 抛光过程进行分析。如图 3(a) 所示, Cassie 模型指出, 当液体接触固体表面时, 固体表面的凹坑(微槽底部空隙)处会留下少许空气, 导致液体无法和固体表面充分贴合。

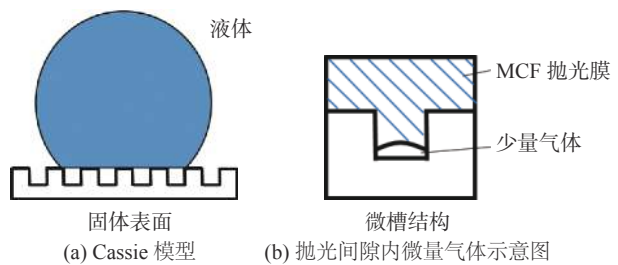


图 3 MCF 与微槽表面接触示意图
Fig.3 Schematic diagram of surface contact of MCF and microgrooves

磁性复合流体与微槽工件接触时, MCF 抛光膜与微槽底部之间形成一层气膜。根据 Young-Laplace 方程^[15]:

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

式中: Δp 表示液面内外压力差; γ 为表面张力; r_1, r_2 为接触两表面的曲率。

如图 3(b) 所示, 微量的气体相对于 MCF 形成凸面相; 此时凸面相为气相, 凹面相为液相, 凸面相的压力高于凹面相^[16]。因此, 产生压力差 Δp , 使得带有抛光颗粒的柔性抛光膜不能很好地同工件表面贴合, 从而影响 MCF 中的抛光颗粒对微槽底部的作用效果。

通过超声振动的作用, 破坏了 MCF 与微槽结构之间的气膜, 使得抛光液中的抛光颗粒能够对槽底进行更好的去除作用。此外, 超声振动的加入使得抛光颗粒获得更大的动能, 提高了抛光效率, 进一步提高了抛光均匀性。

2 试验装置

试验采用 316L 型不锈钢微槽, 微槽相关参数如图 4 所示。

自行搭建的 UMCF 抛光装置如图 5 所示, 超声振子产生轴向超声振动, 抛光轮位于超声振子上方, 微槽工件利用石蜡与超声振子固定。

MCF 抛光液参数和试验参数如表 1 和表 2 所示。

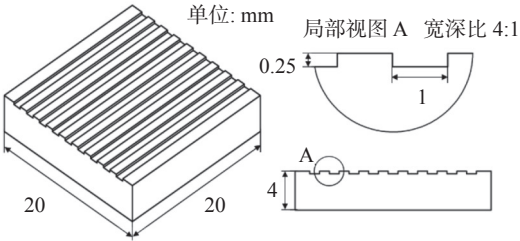


图 4 微槽工件
Fig. 4 Microgrooved workpiece

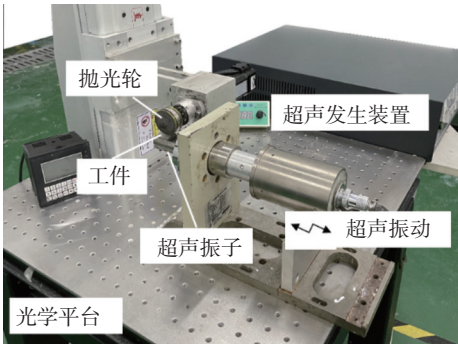


图 5 UMCF 抛光试验装置
Fig. 5 UMCF polishing experimental setup

表 1 MCF 抛光液参数

Tab.1 Composition of MCF slurry

成 分	比值(质量)
羰基铁粉[Fe(CO) ₅]	52%(15.6 g)
抛光粉(Al ₂ O ₃)	14%(5.2 g)
水基磁流体(去离子水+10 nm 铁粉)	31%(9.3 g)
α -纤维素	3%(0.9 g)

表 2 抛光试验参数

Tab.2 Parameters of polishing

试验参数	数值
抛光轮尺寸 (外径×内径×厚度/mm)	40×20×10
抛光轮转速 $V/(r \cdot min^{-1})$	300, 500, 700
抛光时间 t/min	3, 5, 7, 10
抛光间隙 h/mm	1.5, 2, 2.5
羰基铁粉粒径 $N/\mu m$	10, 20, 30, 48
超声振幅 $A/\mu m$	5, 15, 25
超声振动频率 f/Hz	19000

3 试验结果和讨论

3.1 超声振动对微槽底部抛光效果

由 Young-Laplace 方程可知, 微槽结构会影响压力差的作用。为了探究超声振动对抛光微槽底部的影响, 在槽宽为 1 mm 的条件下, 设定微槽宽

深比 k 对不同结构微槽进行初步研究。

$$k = \frac{w}{h} \tag{2}$$

式中： w 表示微槽的槽宽； h 为微槽的槽深。

图 6 表明，随着宽深比的提高，UMCF 抛光后槽底表面粗糙度下降并趋于平缓。当宽深比为 4 时，UMCF 抛光后微槽底部表面粗糙度下降到 $0.403\text{ }\mu\text{m}$ 。这表明超声振动改善了 MCF 抛光微沟槽底部的光整效果；此外，UMCF 抛光能够显著降低宽深比 $k=4, 5$ 的沟槽底部表面粗糙度。由于宽深比越大，越接近平面，因此，选择适合 UMCF 抛光的最小宽深比 $k=4$ 的微槽工件进行后续研究。

3.2 微槽表面形貌

根据前面的试验结果，超声振动加入后，微槽底部表面粗糙度有明显降低。图 7 为 MCF 和 UMCF 抛光微槽表面的扫描电镜图像，通过对比 SEM 图像可以看出，超声振动改善了 MCF 抛光对微槽底部的光整效果，得到了较好的底部表面形貌。

在金相显微镜 (AOSVI, M230-21BLC) 下观察工件的表面形貌。在图 8 中，UMCF 抛光微槽底

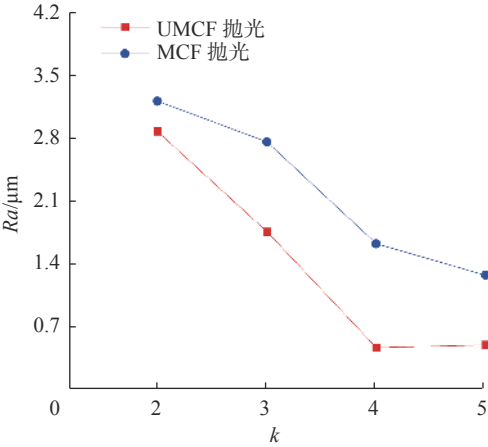


图 6 微槽底部表面粗糙度

Fig. 6 Surface roughness of the bottom surface

部的效果相对于 MCF 抛光有显著提高。在图 9 中，UMCF 抛光后微槽顶部表面划痕明显减少。这表明在超声振动作用下，抛光颗粒切向运动，使得抛光颗粒对表面作用更加均匀。

图 10 采用超景深显微镜 (基恩士 VHK-500) 拍摄微槽三维形貌。通过比较抛光前、后表面形貌，UMCF 抛光对微槽底部表面质量有明显提高，并且对微槽结构没有造成明显破坏。

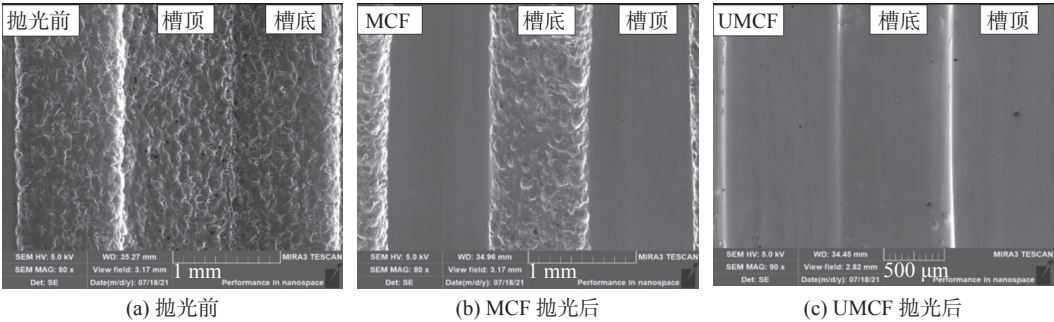


图 7 MCF 和 UMCF 抛光微槽扫描电镜图像

Fig.7 Scanning electron microscope image of the microgrooves in MCF and UMCF

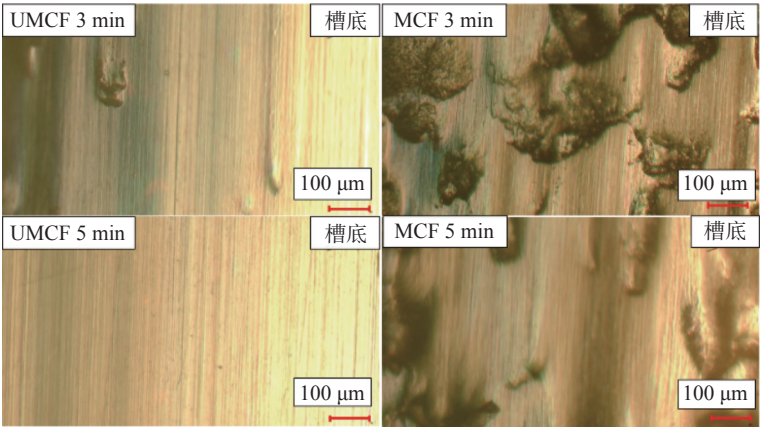


图 8 MCF 和 UMCF 抛光槽底表面形貌

Fig.8 Surface topography of the bottom surface in MCF and UMCF

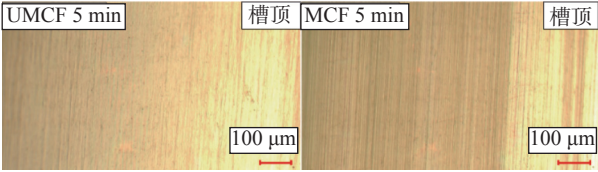


图 9 MCF 和 UMCf 抛光槽顶表面形貌

Fig. 9 Surface topography of the top surface in MCF and UMCf

3.3 表面粗糙度

3.3.1 槽顶表面粗糙度

图 11 表明不同条件下 MCF 抛光和 UMCf 抛光后微槽顶部表面粗糙度 Ra 的变化。在图 11(a) 中, 当抛光轮转速为 500 r/min 时, UMCf 抛光微槽顶部 Ra 达到最小值。在图 11(b) 和 11(c) 中, 微槽顶部 Ra 随着抛光时间和抛光间隙的提高呈现先减小后增加的趋势。UMCF 抛光 3 min 后效果显著提高, 5 min 时微槽顶部 Ra 达到最小值。两种抛

光方式下, 当抛光间隙为 2 mm 时, 微槽顶部 Ra 最小, 此时抛光效果最好。在图 11(d) 中, 碳基铁粉的粒径超过 20 μm 后, 微槽顶部 Ra 下降趋势减缓; 当碳基铁粉粒径为 48 μm 时效果最佳。图 11(e) 表明, 随着超声振幅的提高, 抛光液的损失加剧, 微槽顶部 Ra 增加。

在不同加工条件下, 相比于 MCF 抛光, UMCf 抛光后微槽顶部表面粗糙度更低。由此表明 UMCf 抛光进一步改善了微槽顶部的表面质量。

3.3.2 槽底表面粗糙度

图 12 表明不同条件下 MCF 抛光和 UMCf 抛光后微槽底部表面粗糙度 Ra 的变化。在图 12(a) 中, MCF 抛光后微槽底部 Ra 随抛光轮转速的增加而降低。UMCF 抛光后, 微槽底部的表面粗糙度在抛光轮转速为 500 r/min 时达到最小值。图 12(b) 中, UMCf 抛光 5 min 后, 微槽底部的表面粗糙度

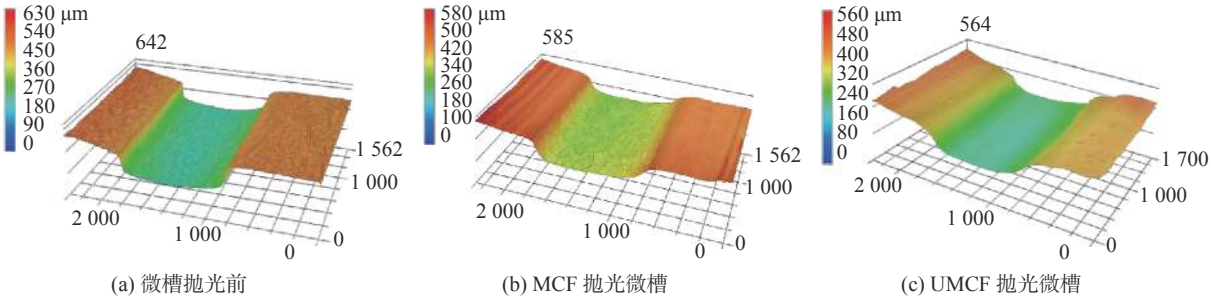


图 10 MCF 和 UMCf 抛光微槽三维形貌

Fig.10 3D topography microscope image of the microgrooves in MCF and UMCf

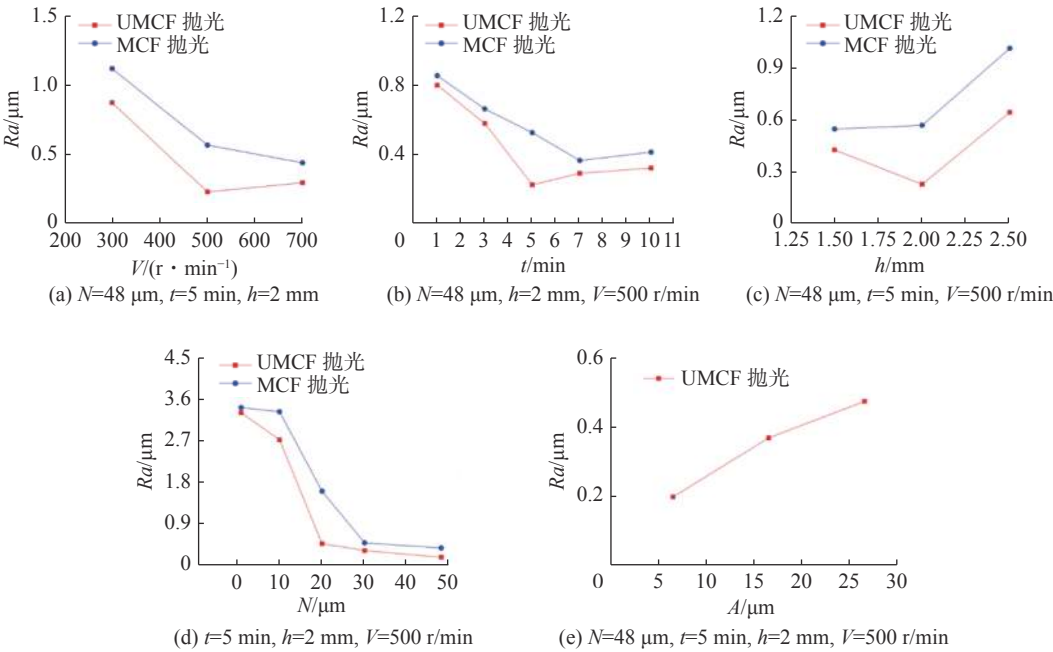


图 11 MCF 和 UMCf 抛光槽顶表面粗糙度

Fig.11 Surface roughness of the top surface in MCF and UMCf

达到最小值并且变化趋于平缓。图 12(c) 中, MCF 抛光后微槽底部 Ra 随着抛光间隙的增加而增加; 当抛光间隙为 2.5 mm 时, 微槽底部 Ra 为 3.7 μm , 这表明此时 MCF 抛光几乎没有去除作用。而在 UMCF 抛光中, 当抛光间隙为 2 mm 时, 微槽底部 Ra 达到最小值。在图 12(d) 中的两种抛光方式下, 随着羰基铁粉的粒径的增大, 微槽底部 Ra 呈现下降趋势; 当羰基铁粉粒径为 48 μm 时, UMCF 抛光后微槽底部 Ra 为 MCF 抛光后微槽底部 Ra 的 1/4。图 12(e) 表明, 随着超声振幅的提高, 抛光液

的损失加剧, 微槽底部 Ra 增加。

在不同加工条件下, UMCF 抛光后微槽底部表面粗糙度达到 0.403 μm , 而 MCF 抛光后微槽底部表面粗糙度为 1.219 μm 。由此表明, MCF 抛光很难对微槽底部产生光整效果, 而 UMCF 抛光显著改善了微槽底部表面质量。

3.4 材料去除率

图 13 表明不同条件下两种抛光方式对微槽的材料去除率 MRR 。在图 13(a) 中, UMCF 抛光下的 MRR 随着抛光轮转速呈现出先增大再减小的趋

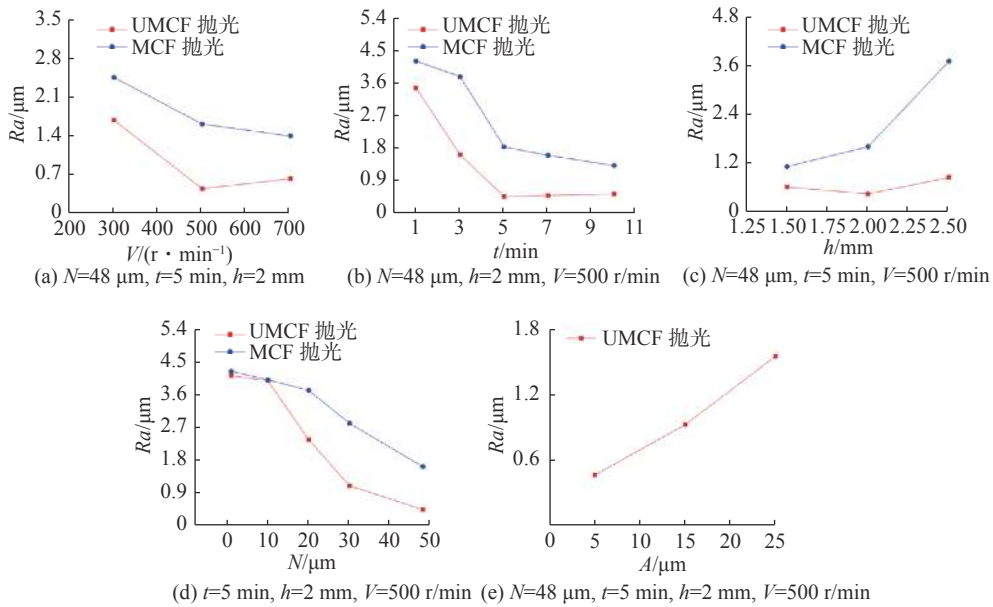


图 12 MCF 和 UMCF 抛光槽底表面粗糙度

Fig.12 Surface roughness of the bottom surface in MCF and UMCF

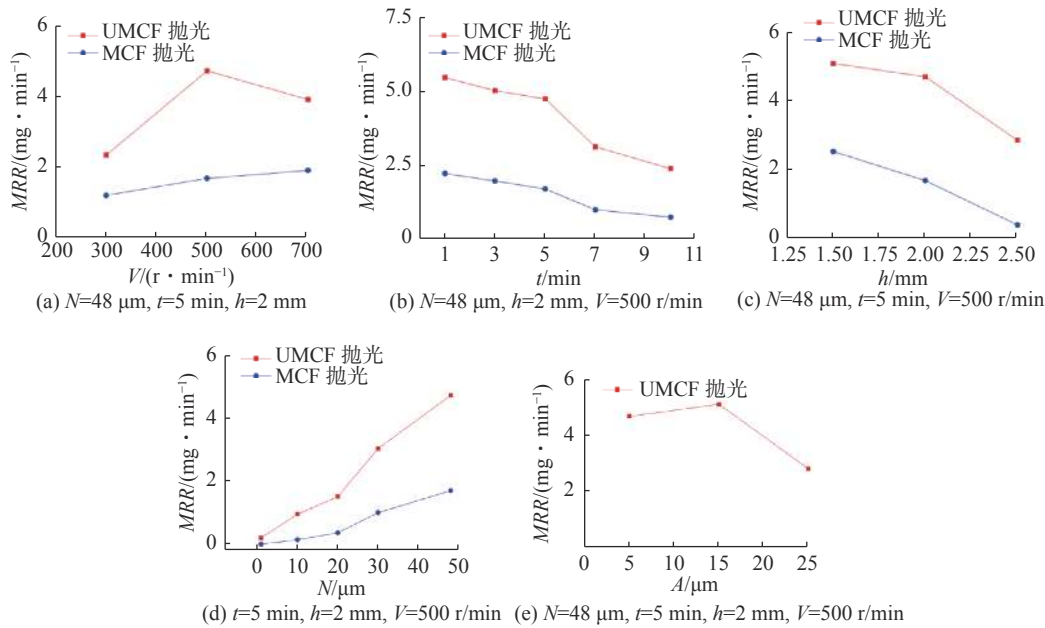


图 13 MCF 和 UMCF 抛光材料去除率

Fig.13 Material removal rate in MCF and UMCF

势,当抛光轮转速为 500 r/min 时 MRR 最大。在图 13(b) 和 13(c) 中,在两种抛光方式下, MRR 随着抛光时间和抛光间隙的增加而减少。在图 13(d) 中,在两种抛光方式下, MRR 均随着羰基铁粉粒径的增大而增大。图 13(e) 表明,超声振幅超过 15 μm 时, MRR 下降。

UMCF 抛光微槽时,去除率高于 MCF 抛光。由此表明,超声振动的作用显著提高了抛光加工效率。

4 结 论

针对微槽底部进行 MCF 和 UMCF 抛光工艺研究。通过试验探究超声振动对 MCF 抛光微槽底部的改善效果,得到不同条件下的微槽表面形貌、微槽表面粗糙度和去除率。结果如下:

a. 对于不同结构的微槽,超声振动对 MCF 抛光微槽底部产生不同的影响:当宽深比 $k=4$ 时,频率为 19 kHz,振幅为 5 μm 的超声振动对 MCF 抛光微槽底部的影响最显著。

b. 超声振动改善了 MCF 抛光不锈钢微槽工件的表面质量。在 UMCF 抛光下,微槽底部表面粗糙度随着抛光轮转速和抛光时间的增加而降低并趋于平缓,随着羰基铁粉粒径的增加而降低,当羰基铁粉粒径为 48 μm 时,表面粗糙度取得最小值。随着超声振幅的增大,表面质量降低。当抛光间隙为 2 mm 时,表面粗糙度取得最小值,表面质量较高。此外,超声振动显著提高了 MCF 抛光微槽的材料去除率。

c. 试验得到 UMCF 抛光微槽的最优参数:当羰基铁粉粒径为 48 μm ,抛光时间为 5 min,抛光轮转速为 500 r/min,抛光间隙为 2 mm,振幅为 5 μm 时,UMCF 抛光后微槽顶部表面粗糙度 Ra 达到 0.217 μm ;槽底表面粗糙度为 0.403 μm ,去除率为 4.74 mg/min。

参考文献:

- [1] 赵清亮,孙智源,郭兵. 碳化硅圆柱槽微结构表面的化学机械抛光[J]. 机械工程学报, 2015, 51(15): 183–189.
- [2] WANG L L, ZHAO X T, HE M X, et al. Effect of micro-grooves on lubrication performance of friction pairs[J]. *Meccanica*, 2021, 56(2): 351–364.
- [3] SOONG C Y, WANG S H. Theoretical analysis of electrokinetic flow and heat transfer in a microchannel under asymmetric boundary conditions[J]. *Journal of*

Colloid and Interface Science, 2003, 265(1): 202–213.

- [4] 许桢英,张园园,王匀,等. 微型燃料电池双极板成形工艺的研究进展[J]. *电源技术*, 2015, 39(4): 861–863.
- [5] JANG P R, JANG T S, KIM N C, et al. Laser micro-polishing for metallic surface using UV nano-second pulse laser and CW laser[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(9/12): 2367–2375.
- [6] TSAI F C, KE J H. Abrasive jet polishing of micro-channels using compound SiC abrasives with compound additives[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(5/8): 1151–1159.
- [7] GUO J, LIU K, WANG Z F, et al. Magnetic field-assisted finishing of a mold insert with curved microstructures for injection molding of microfluidic chips[J]. *Tribology International*, 2017, 114: 306–314.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] JIANG C, WU T, YE H, et al. Estimation of energy and time savings in optical glass manufacturing when using ultrasonic vibration-assisted grinding[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2019, 6(1): 1–9.
- [12] MIRIAN S, SAFARI M, FADAEI A, et al. Improving the quality of surface in polishing process with the magnetic abrasive powder polishing (MAPP) by use of ultrasonic oscillation of work-piece on a CNC table[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(2): 275–284.
- [13] JIANG C, HUANG J L, JIANG Z Y, et al. Estimation of energy savings when adopting ultrasonic vibration-assisted magnetic compound fluid polishing[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2021, 8(1): 1–11.
- [14] 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.
- [15] 高世桥,刘海鹏. 毛细力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] CASSIE A B D. Contact angles[J]. *Discussions of the Faraday Society*, 1948, 3: 11–16.