

沟槽的超声振动辅助磁性复合流体抛光仿真分析

魏久翔

(上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

✉wei_jiuxiang@126.com



摘要: 为了探究沟槽工件在超声振动辅助磁性复合流体(Ultrasonic Vibration-assisted Magnetic Compound Fluid, UVMCF)抛光过程中流体性能对抛光加工的影响, 对沟槽的超声振动辅助磁性复合流体抛光进行仿真分析并通过工艺实验进行验证。首先利用COMSOL Multiphysics有限元分析软件建立UVMCF抛光过程中抛光液流动的数学模型, 进而分析超声振动下抛光液的流动特性; 再以316L型不锈钢沟槽作为加工对象, 进行UVMCF抛光工艺实验并获得最佳工艺参数。研究结果表明: 磁性复合流体(Magnetic Compound Fluid, MCF)抛光液在沟槽中流动的过程中, 对沟槽表面压力呈现周期性变化, 在1/4周期处取得最大值; 当抛光时间为5 min、抛光轮转速为500 rpm、振幅为5 μm 时抛光效果最佳, 沟槽顶部表面粗糙度Ra达到0.217 μm , 槽底表面粗糙度Ra达到0.403 μm , 去除率为4.74 mg/min。

关键词: 超声振动; 磁性复合流体; COMSOL; 仿真分析; 沟槽

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Simulation Analysis of Ultrasonic Vibration-assisted Magnetic Compound Fluid Polishing of Grooves

WEI Jiuxiang

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

✉wei_jiuxiang@126.com

Abstract: In order to explore the influence of fluid properties on the polishing process of grooved workpiece in ultrasonic vibration-assisted magnetic compound fluid (UVMCF) polishing, this paper proposes to simulate and analyze the ultrasonic vibration-assisted magnetic compound fluid polishing, and it is verified by a process test. Firstly, finite element analysis software of COMSOL multiphysics is used to establish the mathematical model of polishing fluid flow in UVMCF polishing process, and then the flow characteristics of polishing fluid under ultrasonic vibration are analyzed. Taking 316L stainless steel groove as the machining object, the UVMCF polishing process test is carried out and the best process parameters are obtained. Research results show that during the flow of MCF polishing fluid in the groove, the pressure of the polishing fluid on the groove surface changes periodically, and the maximum value is obtained at 1/4 cycle. When the polishing time is 5 minutes, the speed of the polishing wheel is 500 rpm, and the amplitude is 5 μm , the polishing effect is the best: the surface roughness Ra of the groove top reaches 0.217 μm , the surface roughness Ra of the groove bottom reaches 0.403 μm , and the removal rate is 4.74 mg/min.

Keywords: ultrasonic vibration; magnetic compound fluid; COMSOL; simulation analysis; groove

1 引言(Introduction)

沟槽型通道反应器是氢燃料电池制氢系统的核心元件之一^[1]。沟槽结构作为微型元器件中常见的结构, 在国防军事、汽车电子、精密仪表等领域得到广泛使用^[2]。对于微尺寸零件, 表面质量对工件性能的影响尤为显著^[3]。对于微流控元器件, 表面粗糙度会直接影响流体的流动性^[4]。为了去除微型元器件加工中产生的表面缺陷, 需要对加工成型后的零件进行

抛光处理。然而, 新颖的超精密表面加工方法往往缺乏理论性研究, 针对这些加工方法往往需要进行仿真探索。

国内外许多研究人员对抛光加工仿真进行了深入研究。哈尔滨工业大学的常敬忠等对超声振动辅助抛光的流场进行计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析, 利用FLUENT非稳态动网格湍流和离散相模型并结合mixture的空化模块, 研究了不同超声振动参数影响下流场绝

对压强、流速和气含率分布的相互作用规律^[5]。管华双等基于FLUENT开展了不锈钢沟槽的磨料水射流抛光仿真研究,分析了不同工艺参数下沟槽底部剪切力分布并进行工艺验证^[6]。姚炳廷等利用多物理场数值计算方法,建立了超声搅拌磁流变抛光液的声场仿真模型^[7]。王璐璐等基于COMSOL建立了磁性复合流体抛光的磁流耦合仿真模型,分析了抛光液流动特性并进行实验验证^[8]。SKOCZYPIEC研究了超声辅助电加工间隙内电解液压力流速和气相分数的数值模拟^[9]。此外,李亚飞等基于COMSOL对非牛顿流体在管道中的流动情况进行了仿真研究^[10]。

MCF抛光最早由SHIMADA等提出^[11]。MCF结合了磁流变液(Magnetorheological Fluid, MRF)和磁流体(Magnetic Fluid, MF)的优点^[12],具有抛光液黏度可保持连续、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^[13]。由于MCF抛光液黏度可控的特点,适合对沟槽进行光整加工。此外,通过引入超声振动进一步改善沟槽底部的抛光效果。

超声振动辅助抛光(Ultrasonic Vibration-assisted Polishing, UVP)能够提高加工性能,目前被广泛应用于辅助加工过程^[14]。与其他抛光方式相比,UVMCF抛光作为一种较为新颖的超精密加工技术,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^[15]。作为一项新型光学精密加工技术,国内对于UVMCF抛光的研究较少。

本文根据COMSOL Multiphysics有限元分析软件建立了UVMCF抛光过程中抛光液流动的数学模型,进而分析了超声振动下抛光液的流动特性;再以316L型不锈钢沟槽作为加工对象,研究不同参数下进行MCF抛光和UVMCF抛光时沟槽表面形貌、去除率和表面粗糙度的变化规律,获得最佳抛光参数。

2 UVMCF抛光流场数值计算模型(Numerical calculation model of UVMCF polishing flow field)

2.1 物理模型和计算域

如图1(a)所示为UVMCF抛光示意图。UVMCF抛光过程中,MCF抛光液由于磁场作用附着在抛光轮表面,其最外层带有抛光磨粒的液体在沟槽工件内流动。为了简化分析,将抛光液在沟槽内流动近似为层流,利用COMSOL Multiphysics内的层流模块进行仿真,表1为COMSOL仿真过程中的主要参数设置。由于三维沟槽流动仿真计算量大,为了节约计算资源,将抛光液在沟槽中流动情况简化为如图1(b)所示的流体计算域模型。入口1设置为速度进口,抛光液以抛光轮线速度大小流入沟槽;入口2为超声振动壁面,出口设置为压力出口边界,其余表面设置为无滑移壁面。流体计算域初始压力条件设置为1个大气压。

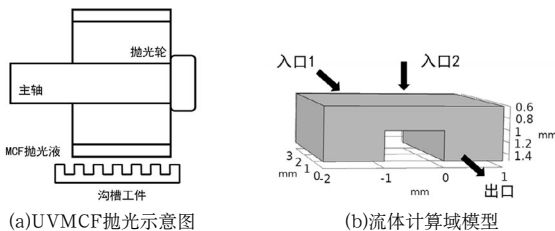


图1 UVMCF抛光示意图及计算域模型

Fig.1 Schematic diagram and calculation domain model of UVMCF polishing

表1 COMSOL参数设置

Tab.1 COMSOL parameter setting

模拟参数	参数值/条件
流体属性	Bingham模型
入口边界	速度入口
出口边界	压力出口
壁面条件	无滑移边界
求解器设置	瞬态求解器

2.2 控制方程

2.2.1 连续性方程

在宏观流体研究过程中,流体流动应遵循质量守恒定律、牛顿第二定律及能量守恒定律。在UVMCF抛光过程中忽略传热的影响,因此不考虑能量守恒。MCF抛光液外层流动过程中遵守质量守恒,其连续性方程如式(1)所示:

$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

其中, ρ 为流体的密度, V_x 、 V_y 、 V_z 分别代表X、Y、Z三个坐标轴方向上的速度分量。由于MCF抛光液外层流体为不可压缩流,可以将流体密度设为常数。改进后的连续性方程如式(2)所示:

$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

2.2.2 运动方程

根据不可压缩流体的微分方程,即Navier-Stokes方程如式(3)所示:

$$\begin{cases} \rho \frac{dV_x}{dt} = \frac{\partial P}{\partial x} + \rho X + \mu \Delta V_x \\ \rho \frac{dV_y}{dt} = \frac{\partial P}{\partial y} + \rho Y + \mu \Delta V_y \\ \rho \frac{dV_z}{dt} = \frac{\partial P}{\partial z} + \rho Z + \mu \Delta V_z \end{cases} \quad (3)$$

其中, P 代表压力, μ 为动力黏度。

2.2.3 超声振动方程

图1(b)中的入口2为超声振动壁面,抛光液会随着超声波发生振动。抛光颗粒简谐位移如图2所示。

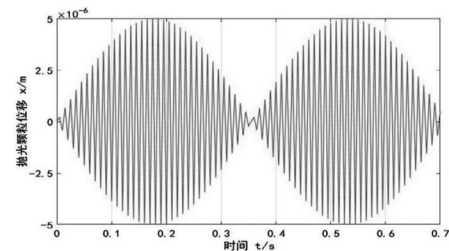


图2 抛光颗粒简谐位移示意图

Fig.2 Schematic diagram of simple harmonic displacement of polishing particles

根据超声谐振方程,得到超声振动壁面的位移方程如式(4)所示:

$$y = A_0 \cos(2\pi ft + \omega) \quad (4)$$

其中, A_0 为超声振幅, ω 为相位, f 为超声振动频率。通过求导得出超声振动壁面速度如式(5)所示:

$$y = 2\pi f A_0 \sin(2\pi f t) \quad (5)$$

不考虑流体域热传导作用, 超声振幅 A_0 为 $5 \mu\text{m}$, 超声频率 f 为 20 kHz 。

2.3 网格划分

仿真计算过程中, 网格的类型和数量决定了计算结果的精确性。在本仿真流体计算域中, 对边界采用COMSOL的 Mesh refine功能进行网格细化。为了保证网格精度, 选择非结构性三角形网格, 划分单元个数为87,826个, 如图3所示。

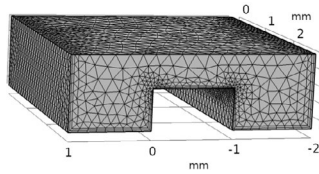


图3 流体计算域网格划分

Fig.3 Fluid computing domain meshing

3 计算结果分析(Analysis of calculation results)

为了对比施加超声振动前后MCF抛光沟槽压力分布变化, 首先对无超声振动下的MCF抛光压力分布进行仿真。将上文所述入口2改为无滑移边界壁面, 其他条件不变。仿真结果如图4所示, 结果表明, 无超声振动条件下, 抛光液对沟槽表面压力分布集中在入口处, 其余位置压力较小, 抛光液对沟槽表面作用面积小。

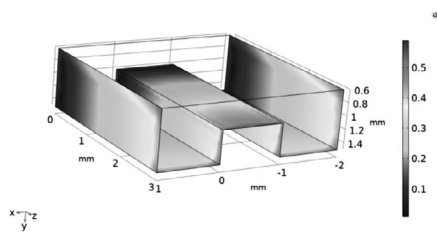
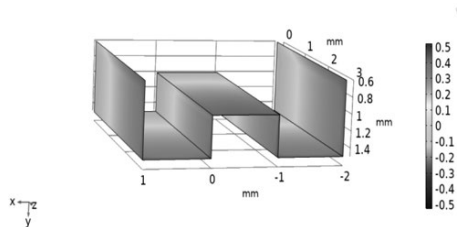


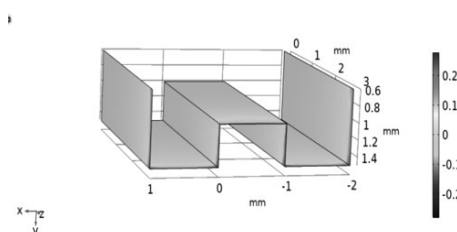
图4 无超声振动条件下抛光压力云图

Fig.4 Nephogram of polishing pressure without ultrasonic vibration

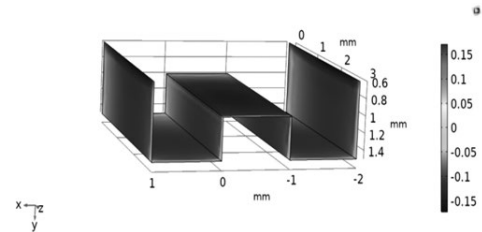
在施加超声振动后, UVMCF抛光压力云图如图5所示。抛光液对沟槽工件表面压力呈现周期性变化, 当抛光时间为 $12.5 \mu\text{s}$, 即 $1/4$ 周期时, 沟槽工件表面受到的压力作用最大, 最大值为 0.482 MPa 。此外, 从图5(a)中可知, 抛光液对沟槽表面压力呈现非均匀分布, 表面压力沿 Z 轴正方向增大。



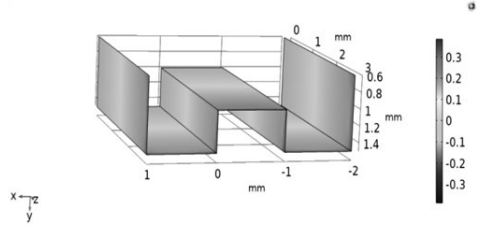
(a) $t = 12.5 \mu\text{s}$



(b) $t = 25 \mu\text{s}$



(c) $t = 37.5 \mu\text{s}$

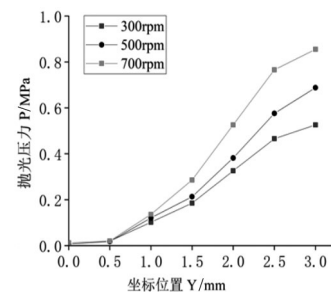


(d) $t = 50 \mu\text{s}$

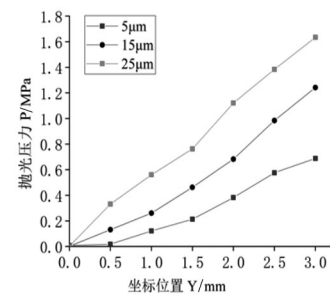
图5 UVMCF抛光压力云图

Fig.5 Nephogram of UVMCF polishing pressure

不同参数下沟槽表面压力分布如图6所示。根据上文仿真结果可知, UVMCF抛光沟槽表面压力在 $1/4$ 周期处取得最大值。因此, 将该时间点的抛光压力作为参照点进行后续不同条件下沟槽表面压力分布的研究。由图6(a)可知, 随着抛光轮转速的不断提, 沟槽表面抛光压力呈现上升趋势。当坐标位置小于 1 mm 时, 转速的增加对抛光压力影响较小; 当坐标位置沿正方向移动时, 抛光压力变化较大。由图6(b)可知, 随着超声振幅的增加, 抛光压力进一步提高。当超声振幅为 $5 \mu\text{m}$ 时, 抛光压力最大值为 0.586 MPa ; 当超声振幅为 $25 \mu\text{m}$ 时, 抛光压力最大值为 1.723 MPa 。相比于抛光轮转速, 超声振幅对超声压力的影响较大。



(a) 抛光轮转速



(b) 超声振幅

图6 不同参数下沟槽表面压力分布

Fig.6 Pressure distribution on groove surface under different parameters

4 实验装置(Test device)

实验采用316L型不锈钢沟槽, 沟槽相关参数如图7所示。

自行搭建的UVMCF抛光装置如图8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，沟槽工件利用石蜡与超声振子固定。

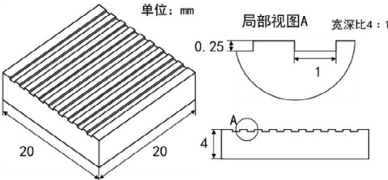


图7 沟槽工件

Fig.7 Micro-grooved workpiece

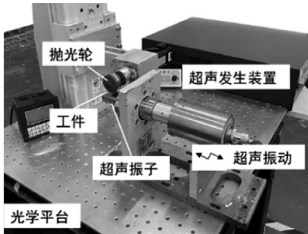


图8 UVMCF抛光实验装置

Fig.8 UVMCF polishing experimental setup
UVMCF抛光实验参数如表2所示。

表2 抛光实验参数

Tab.2 Parameters of polishing test

实验参数	数值
抛光轮转速 V/rpm	300, 500, 700
抛光时间 t/min	3, 5, 7, 10
超声振幅 $A/\mu\text{m}$	5, 15, 25
超声振动频率 f/Hz	19,000

5 实验结果和讨论(Test results and discussion)

5.1 沟槽表面形貌

在金相显微镜(AOSVI, M230-21BLC)下观察沟槽的表面形貌。由于沟槽结构存在槽底和槽顶两个部分，因此需要分别拍摄沟槽上下表面的表面形貌。不同抛光轮转速抛光前后沟槽底部表面形貌如图9所示，随着抛光轮转速的提高，UVMCF抛光后沟槽底部的毛刺和划痕得到明显改善，当抛光轮转速为500 rpm时表面形貌最佳。不同抛光轮转速抛光前后沟槽顶部表面形貌如图10所示，相比于沟槽底部，沟槽顶部在UVMCF抛光后表面形貌更好。随着抛光轮转速的提高，表面缺陷得到明显改善，抛光后沟槽顶部表面形貌趋于稳定。

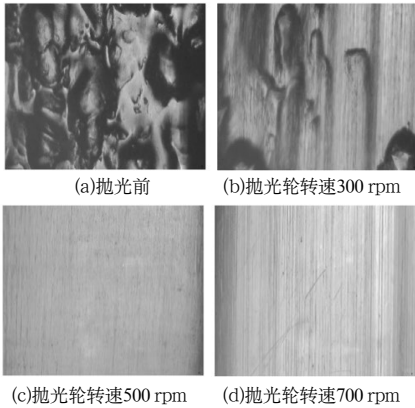


图9 不同抛光轮转速抛光前后沟槽底部表面形貌

Fig.9 Surface topography of groove bottom before and after polishing with different polishing wheel speeds

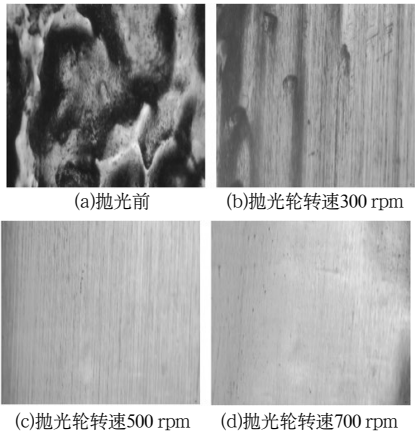


图10 不同抛光轮转速抛光前后沟槽顶部表面形貌

Fig.10 Surface topography of groove top before and after polishing with different polishing wheel speeds

5.2 表面粗糙度

5.2.1 沟槽底部表面粗糙度

不同条件下MCF抛光和UVMCF抛光后沟槽底部表面粗糙度 R_a 的变化如图11所示。图11(a)中，UVMCF抛光后沟槽底部表面粗糙度随抛光轮转速提高而减小，沟槽底部表面粗糙度在抛光轮转速为500 rpm时达到最小值。图11(b)中，沟槽底部表面粗糙度在UVMCF抛光5 min左右达到最小值。随着时间的增加，粗糙度变化趋于平缓。图11(c)表明，随着超声振幅的提高，沟槽底部表面粗糙度增加，这和上文仿真结果存在一定差异，由于超声振幅提高，抛光液的损失加剧，从而导致抛光效果下降。

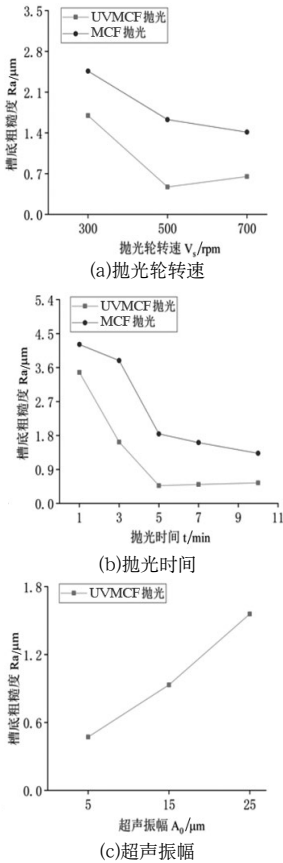


图11 MCF和UVMCF抛光沟槽底部表面粗糙度

Fig.11 Groove bottom surface roughness respectively by MCF polishing and UVMCF polishing

不同加工条件下, UVMCF抛光后沟槽底部表面粗糙度达到 $0.403\ \mu\text{m}$, 而MCF抛光后沟槽底部表面粗糙度为 $1.219\ \mu\text{m}$ 。由此表明, MCF抛光很难对沟槽底部产生光整效果, 而UVMCF抛光显著改善了沟槽底部表面质量。

5.2.2 沟槽顶部表面粗糙度

不同条件下MCF抛光和UVMCF抛光后沟槽顶部表面粗糙度 R_a 的变化如图12所示。由于沟槽深度的影响, 相较于沟槽底部表面粗糙度, UVMCF抛光后沟槽顶部表面粗糙度显著降低。图12(a)中, UVMCF抛光后沟槽顶部表面粗糙度在抛光轮转速为500 rpm时达到最小值。图12(b)中, 沟槽顶部的表面粗糙度在UVMCF抛光5 min左右达到最小值, 随着时间的增加, 粗糙度略有提高。图12(c)表明, 随着超声振幅的提高, 沟槽顶部表面粗糙度增加。

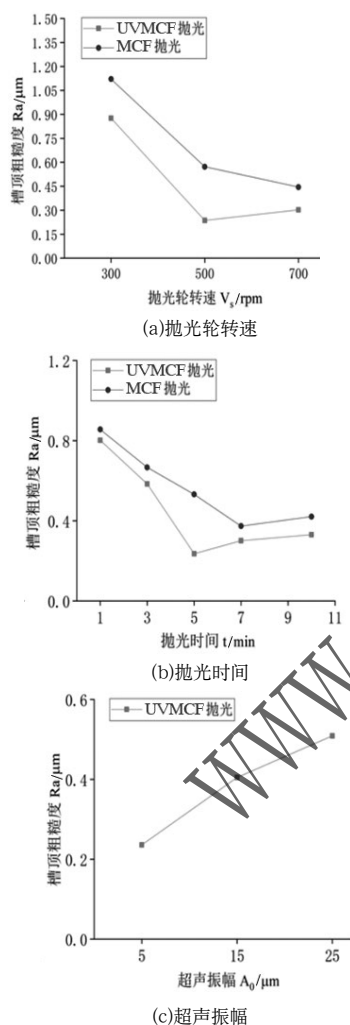


图12 MCF和UVMCF抛光沟槽顶部表面粗糙度

Fig.12 Groove top surface roughness respectively by MCF polishing and UVMCF polishing

对于沟槽顶部表面, 添加超声振动后表面质量略有提高, 提升效果不如沟槽底部明显。不同加工条件下, UVMCF抛光后沟槽顶部表面粗糙度最小值为 $0.217\ \mu\text{m}$ 。由此表明超声振动能够改善沟槽顶部表面质量。

5.3 材料去除率

图13表明了不同条件下两种抛光方式对沟槽的材料去除率MRR。图13(a)中, UVMCF抛光下的材料去除率随着抛光轮转速增加呈现出先增大再减小的趋势, 当抛光轮转速为

500 rpm时材料去除率最大。图13(b)中, 两种抛光方式下材料去除率随着抛光时间的增加而减少。图13(c)表明, 超声振幅超过 $15\ \mu\text{m}$ 时, 材料去除率下降。

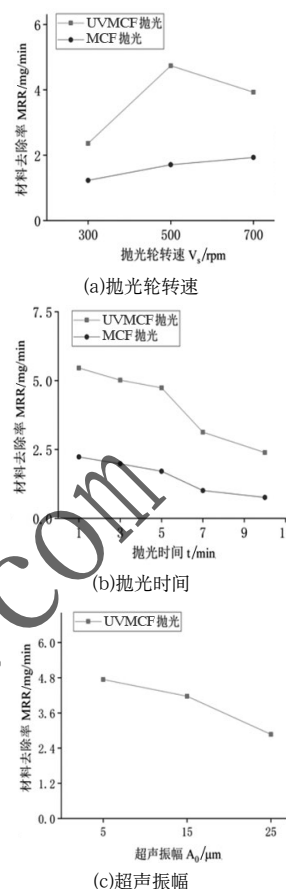


图13 MCF和UVMCF抛光材料去除率

Fig.13 Polishing material removal rates of MCF and UVMCF
UVMCF抛光沟槽时, 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。

6 结论(Conclusion)

本文针对UVMCF抛光过程中抛光液在沟槽表面的流动情况建立数学模型, 仿真分析了抛光液的流动特性。UVMCF抛光流场仿真结果表明: 由于超声振动的影响, 沟槽底部压力随时间呈现周期性改变, 在 $1/4$ 周期处取得最大值。沟槽底部压力随着抛光轮转速以及超声振幅的增大而增大, 超声振幅对沟槽表面压力影响较大, 当超声振幅为 $5\ \mu\text{m}$ 时, 抛光压力最大值为 $0.586\ \text{MPa}$; 当超声振幅为 $25\ \mu\text{m}$ 时, 抛光压力最大值为 $1.723\ \text{MPa}$ 。并且, 在仿真分析的基础上进行了实验验证, 得到UVMCF抛光沟槽的最优参数: 抛光时间为5 min, 抛光轮转速为500 rpm, 振幅为 $5\ \mu\text{m}$ 时, UVMCF抛光加工后得到的沟槽顶部表面粗糙度 R_a 达到 $0.217\ \mu\text{m}$, 槽底表面粗糙度达到 $0.403\ \mu\text{m}$, 去除率为 $4.74\ \text{mg/min}$ 。

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] WANG L L, ZHAO X T, HE M, et al. Effect of micro grooves on lubrication performance of friction pairs[J]. Meccanica, 2021, 56: 351–364.

(下转第62页)