

磁性复合流体的深孔抛光工艺试验研究

王璐璐, 姜 晨, 管华双, 李佳音

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对深孔零件光整加工技术的难题, 提出了基于针式抛光头的磁性复合流体 (MCF) 深孔抛光的加工方法。首先利用 COMSOL Multiphysics 有限元软件建立不同的永磁铁磁场组合模型, 根据仿真结果设计磁场分布均匀且强度较强的针式抛光头; 再建立 MCF 深孔抛光的磁流场耦合模型, 分析 MCF 的流动特性; 以黄铜 H62 的深孔零件为加工对象, 进行磁性复合流体的深孔抛光工艺试验研究。仿真结果与试验结果吻合, 结果表明, 当针式抛光头采用纵向单列磁芯结构, 转速为 800 r/min, 抛光间隙为 3 mm, 羟基铁粉粒径为 48 μm 时, 表面粗糙度为 0.13 μm , 材料去除率为 0.025 mg/min, 从而获得了最理想的 MCF 深孔抛光效果。

关键词: 磁性复合流体; 深孔抛光; 磁芯结构; 针式抛光头; 黄铜 H62

中图分类号: TG 580 **文献标志码:** A

Experimental study on deep hole polishing with magnetic compound fluid

WANG Lulu, JIANG Chen, GUAN Huashuang, LI Jiayin

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

Abstract: To resolve the difficulties in deep hole finishing technology, a deep hole polishing method based on magnetic compound fluid (MCF) with a needle type polishing head was proposed. Different magnetic field combination models of permanent magnet were established by using the COMSOL Multiphysics finite element software. According to the simulation results, a needle type polishing head with uniform magnetic field distribution and sufficient strength was designed. Then, a coupling model of magnetic fluid field during MCF deep hole polishing was established to analyze the flow characteristics of MCF. Taking brass H62 as processing object, the process of deep hole polishing with magnetic compound fluid was studied. The simulation results are consistent with the experimental results. The results show that when the needle type polishing head adopts the longitudinal single row magnetic core structure, using 800 r/min rotating speed, 3 mm polishing gap, and 48 μm particle size of hydroxy iron powder, the surface roughness is 0.13 μm , and the material removal rate is 0.025 mg/min, the polish effect is best.

Keywords: magnetic compound fluid; deep hole polishing; magnetic core structure; needle type polishing head; brass H62

收稿日期: 2020-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (NO.51475310)

第一作者: 王璐璐 (1995-), 女, 硕士研究生。研究方向: 精密加工技术。E-mail: shiny1120@163.com

通信作者: 姜 晨 (1978-), 男, 教授。研究方向: 精密加工技术。E-mail: jc_bati@163.com

随着光学、电子、航空航天及医疗等领域的高速发展,对深孔零件表面质量的要求不断提高^[1]。由于深孔零件的几何特点^[2-3],现有的深孔光整技术难以实现其高效、可控抛光加工。因此,研究高效、高质量的深孔内壁表面光整加工技术具有重要意义^[4]。

2002年,Shimada等^[5]提出了磁性复合流体(magnetic compound fluid, MCF)的概念,并研制出MCF,它具有较好的黏度与粒子分布稳定性^[6],附加的外磁场能够对MCF中的磨粒产生较大的推动作用力,使MCF成为具有黏塑性的Bingham介质^[7-8],从而在抛光区域内形成“柔性抛光膜”。MCF能够实现可控、确定性加工,不造成亚表面损伤与形变,而且具有一定的自适应性,能够适应各种形状的工件^[4]。我国学者近年来对MCF抛光技术也进行了相关研究。焦黎等^[9]通过建立MCF抛光轮外部空间磁场分布的解析表达式,研究了MCF抛光轮在不同磁极分布方式下,对熔融石英玻璃进行抛光的材料去除特性,讨论了磁场强度分布与材料去除率之间的关系;Wang等^[10]研制了磁性复合抛光体的配制与检测方法,并对不同配比磁性复合抛光体的抛光性能进行了试验研究;Guo等^[11]研究了MCF的正应力和剪切应力对抛光光学玻璃材料去除率的影响;王瑞凯等^[12]对不同加工对象,如具有V槽结构的无氧铜和具有电镀Ni-P镀层的模具钢,进行了MCF抛光特性试验研究。

为了实现高效、可控的深孔内壁表面抛光,发挥MCF抛光的技术优势,本文进行了MCF深孔抛光的工艺试验,利用COMSOL Multiphysics有限元软件建立永磁铁磁场组合模型,设计磁场均匀且强度较强的针式抛光头;建立MCF深孔抛光的磁场耦合模型,分析MCF的流动特性;以黄铜H62为加工材料,通过试验研究了不同抛光参数对MCF深孔抛光的材料去除率和表面粗糙度的影响规律。

MCF 深孔抛光原理

MCF深孔抛光原理如图1所示。将MCF引入深孔工件中,MCF中的磁性颗粒受针式抛光头内永磁铁磁场的作用,从无序分布向沿着磁感线方向有序分布,并链化成磁性簇。磨粒分布于磁性簇内部和间隙中,尺寸较大的植物纤维素分布于

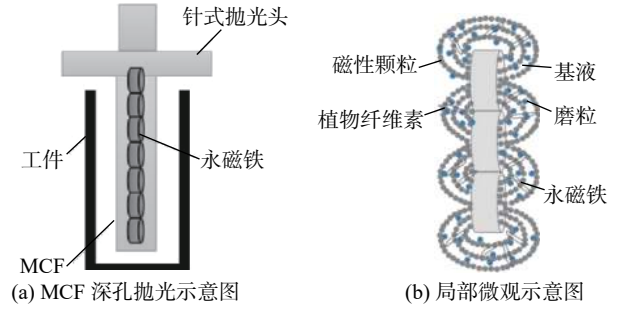


图1 MCF深孔抛光原理图

Fig. 1 MCF Deep hole polishing principle diagram

磁性簇之间。在动态磁场的作用下,MCF受磁场链化动力的作用,将磨粒压向孔内壁。因此,具备了一定速度和压力的磨粒与孔内壁产生相对运动,实现孔内壁的材料去除。

MCF 深孔抛光数学模型

2.1 磁场建模

建立圆柱形永磁铁模型如图2所示。设半径为 R 、高度为 h 的圆柱体被均匀磁化,磁化强度为 M 。由于圆柱形永磁体轴向充磁,只有上端面磁荷 H_{s^+} 、下端面磁荷 H_{s^-} ,没有体磁荷。 s^+ 为上端面, s^- 为下端面。 i, j, k 分别为沿 x, y, z 轴方向的单位矢量。由圆柱形永磁铁的对称性,采用标量磁位法^[13]求解空间任一点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 在 yz 平面的磁场强度 H 。

$$H_{s^+}(x_0, y_0, z_0) = \frac{M}{4\pi} \iint_{s^+} \frac{(x_0 - x)i + yj + (z_0 - z)k}{[(x_0 - x)^2 + y^2 + (z_0 - z)^2]^{3/2}} dS \quad (1)$$

$$H_{s^-}(x_0, y_0, z_0) = \frac{M}{4\pi} \iint_{s^-} \frac{(x_0 - x)i + yj + (z_0 - z)k}{[(x_0 - x)^2 + y^2 + (z_0 - z)^2]^{3/2}} dS \quad (2)$$

$$H(x_0, y_0, z_0) = H_{s^+}(x_0, y_0, z_0) - H_{s^-}(x_0, y_0, z_0) \quad (3)$$

分别计算沿 y, z 轴的磁场强度分量,即可求

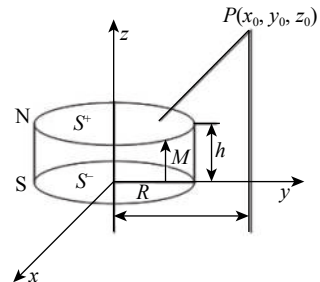


图2 圆柱形永磁铁模型

Fig. 2 Cylindrical permanent magnet model

出点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 的磁场强度。当 n 个永磁铁沿 z 轴放置, 轴线上任一点处的磁感强度应是 n 个永磁铁单独存在时该点磁感应强度的矢量和。磁场强度

$$H_n(x_0, y_0, z_0) = H_1(x_0, y_0, z_0) \pm \dots \pm H_n(x_0, y_0, z_0 - (n-1)h) \tag{4}$$

2.2 流场建模

以连续性方程、动量方程和能量方程构建流动模型。MCF 的基液为水, 有一定的导热作用, 但加工区域温度不是很高, 因此, 忽略能量方程。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{5}$$

式中: ρ 为流体密度; u, v, w 为 t 时刻点 (x, y, z) 处的速度分量。

式(5)表示的是瞬态三维可压流体流动的连续性方程, 由于 MCF 流动处于稳态且不可压缩, 由雷诺判别法^[14]判定其流动状态为层流, 运动密度 ρ 不会随着时间的变化而变化, 因此, MCF 流动过程描述为

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{6}$$

纳维-斯托克斯(N-S)方程

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho X + \mu \Delta u \\ \rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho Y + \mu \Delta v \\ \rho \frac{dw}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho Z + \mu \Delta w \end{cases} \tag{7}$$

式中: p 为压力; X, Y, Z 为外力的分量; μ 为动力黏度。

本构方程

$$\tau = \begin{cases} \tau_y(H) + \eta_0 \dot{\gamma}, & \tau > \tau_0 \\ \eta_r \dot{\gamma}, & \tau \leq \tau_0 \end{cases} \tag{8}$$

式中: τ 为 MCF 的剪切应力; η_0, η_r 分别为 MCF 屈服前、后的动力黏度; $\dot{\gamma}$ 为 MCF 的剪应变率; $\tau_y(H)$ 为与磁场强度相关的剪切屈服应力; H 为磁场强度; τ_0 为剪切应力的临界值。

本构方程与连续性方程、动量方程构成封闭的方程组, 用于分析流体的流动特性。

3 MCF 深孔抛光仿真

3.1 抛光头磁场仿真

设计如图 3 所示的纵向单列、纵向双列、垂

直单列、垂直双列这 4 种不同的磁芯结构排列方式。采用 COMSOL 软件中 AC/DC 模块的“磁场, 无电流”物理场接口模拟磁场模分布。假设永磁铁直径 2 mm、高度 1 mm, 磁铁周围域为空气, 大小为 $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$, 边界条件为磁绝缘条件。通过标准化剖分网格进行稳态求解。

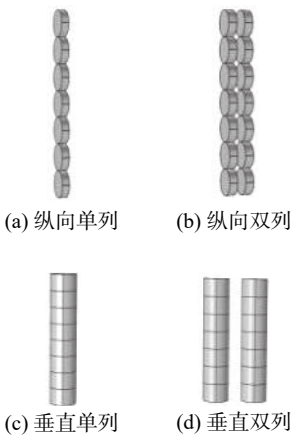


图 3 4 种磁芯结构
Fig.3 Four core structures

图 4 为不同磁芯结构的磁场模分布云图, 纵向磁芯结构磁场模呈现“中间大、两端小”的特点, 且分布较均匀, 有利于 MCF 在抛光头均匀分布。垂直磁芯结构磁场模呈现“中间小、两端大”的特点, 这是因为磁铁充磁面方向的磁场强度明显大于非充磁面方向。综合考虑磁场强度的大小与分布均匀性, 采用纵向单列磁芯结构来制备针式抛光头。

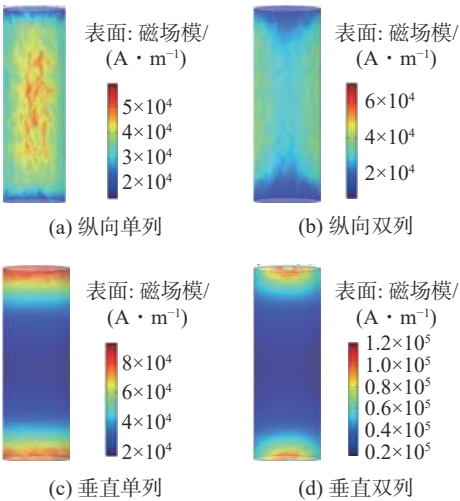


图 4 磁场模分布图

Fig.4 Magnetic field mode distribution diagrams

3.2 MCF 深孔抛光磁场耦合仿真

在求解磁场的基础上耦合流场，采用 COMSOL 中 CFD 模块的“旋转机械，层流”物理场接口模拟流场分布。设置针式抛光头以 800 r/min 旋转，深孔孔径 12 mm，高度 45 mm，屈服应力为 10 kPa，密度为 1 360 kg/m³，流体属性定义为不可压缩层流，深孔内壁上应用无滑移边界条件，超细化网格划分后进行求解。

图 5 为不同转速下的速度场云图，速度随着转速增大而逐渐增大。在转速为 800 r/min 时，速度分布相对均匀且速度较快。不同转速对速度和压力的影响如图 6 所示，随着转速的增大，深孔孔壁位置的流体速度和压力逐渐增大。

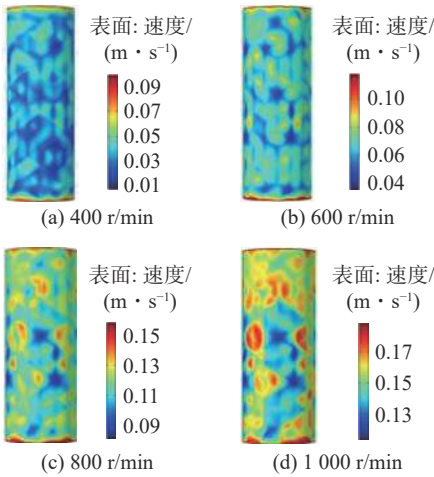


图 5 不同转速下的速度场分布
Fig.5 Velocity field distribution at different speeds

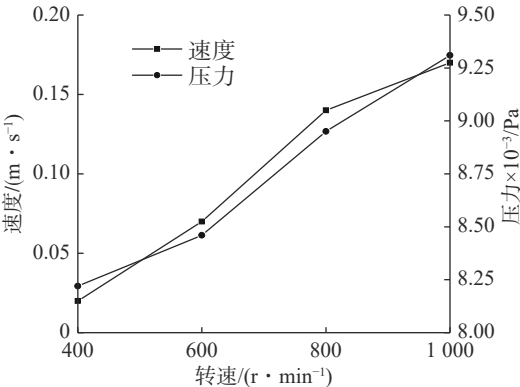


图 6 转速对速度和压力的影响
Fig.6 Effect of rotating speed on the velocity and pressure

抛光间隙对速度和压力的影响如图 7 所示。随着抛光间隙的增大，深孔孔壁位置的速度和压力均逐渐减小。在抛光间隙为 3 mm 时，速度和压力变化速率最大。

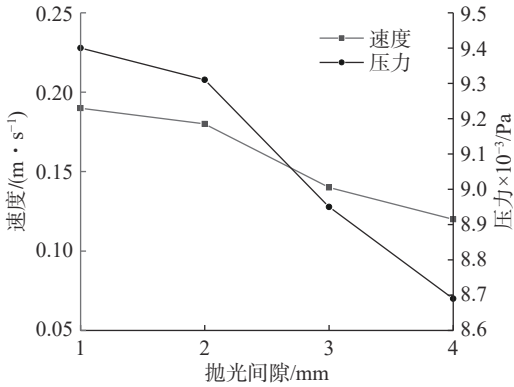


图 7 抛光间隙对速度和压力的影响
Fig. 7 Effect of polishing gap on the velocity and pressure

4 试 验

4.1 试验装置

图 8 为自行研制的 MCF 深孔抛光试验装置及针式抛光头。针式抛光头充磁材料为 N45 钕铁硼，充磁方向为轴向，抛光针直径 6 mm，磁铁直径 2 mm、厚度 1 mm。由于磁铁本身较脆弱，因此，需为磁铁设计保护套，防止磁铁与抛光液直接接触。为了避免在旋转过程中抛光液飞溅，需在抛光针筒上方设置防溅液盘，其直径 30 mm、厚度 15 mm。针盖与针筒之间通过螺纹装配。最终选用 3D 打印技术制备针式抛光头。

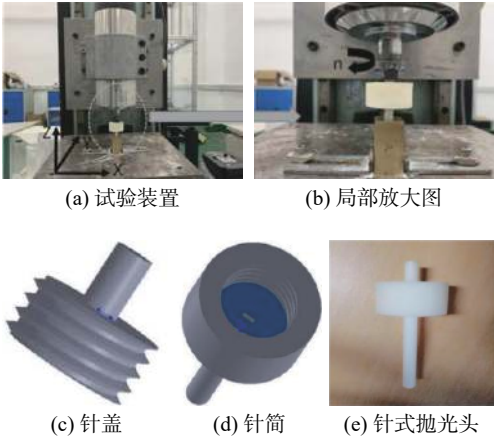


图 8 MCF 深孔抛光试验装置
Fig.8 MCF deep hole polishing test device

MCF 深孔抛光试验装置的主轴通过抱箍固定于 z 轴可移动的钢板上，针式抛光头通过弹性夹筒连接电机主轴，工作台位于针式抛光头的下方，可以通过手轮沿 x, y 轴方向移动，工件通过夹紧机构固定于工作台上，工件与针式抛光头的距离可通过调节工作台 z 方向的高度来实现。试验时使

针式抛光头完全浸没在磁性复合流体中, 通过交流电机带动针式抛光头旋转, 开始对工件进行光整加工。

4.2 试验参数

MCF 由羰基铁粉、去离子水、氧化铝、 α -纤维素组成, 成分配比如表 1 所示。黄铜 H62 深孔零件的孔径为 12 mm、深度为 45 mm。MCF 抛光参数如表 2 所示。使用金相显微镜(基恩士 VHX-2000)观察工件表面形貌, 粗糙度仪(Taylor Hobson-PGI NOVUS)测量工件表面粗糙度, 精密电子称测量抛光前后的工件质量, 并计算材料去除率。

表 1 MCF 的成分配比
Tab.1 Composition ratio of MCF

成分	粒径/ μm	质量分数
羰基铁粉	48	0.52
氧化铝 Al_2O_3	0.5	0.14
去离子水		0.31
α -纤维素		0.03

表 2 MCF 抛光工艺参数
Tab.2 Polishing process parameters of MCF

工艺参数	数值
磁芯结构	纵向单/双列, 垂直单/双列
抛光机转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	400, 600, 800, 1 000
抛光时间/min	5, 10, 15, 20, 30
抛光间隙/mm	1, 2, 3, 4
羟基铁粉粒径/ μm	1, 5, 48

5 试验结果与分析

5.1 表面形貌

不同时间下的表面形貌如图 9 所示。随着抛光时间的增长, 表面形貌不同程度地被改善, 划痕和毛刺逐步减少, 表面光洁度大幅度提高, 并且在抛光时间为 10 min 时, 划痕已明显得到改善。

5.2 试验参数的影响

5.2.1 表面粗糙度

磁芯结构对表面粗糙度的影响如图 10(a)所示。随着抛光时间的增长, 表面粗糙度逐渐减小, 且减小的趋势逐渐平稳。当抛光时间为 30 min 时, 纵向单列磁芯结构的表面粗糙度的最小值仅为 0.13 μm 。

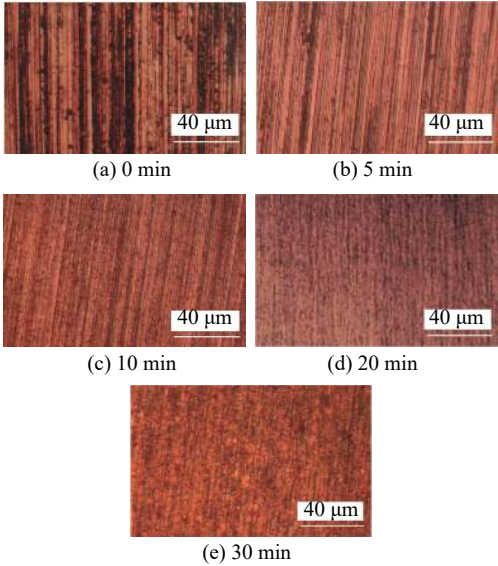


图 9 不同时间下的表面形貌

Fig. 9 Surface morphology at different time

抛光转速对表面粗糙度的影响如图 10(b)所示。随着转速的增大, 表面粗糙度呈 V 型趋势, 当转速为 800 r/min 时, 表面粗糙度达到最低值, 这是因为转速增大, 剪切力增大, 导致表面粗糙度下降。当转速超过一定值后继续增加, 流速变大, 比较散乱的链状粒子发生剪切稀化现象^[14], 使表面粗糙度增大。

抛光间隙对表面粗糙度的影响如图 10(c)所示。随着抛光间隙的增加, 表面粗糙度呈 N 型趋势。在抛光间隙为 3 mm 时, 表面粗糙度达到最低值。这是因为抛光间隙增大, 沿孔内壁的磁场强度变小, 表面粗糙度增大。但当抛光间隙继续增大时, MCF 抛光线速度增大, 抛光效果增强, 使表面粗糙度下降。当抛光间隙继续增大, 抛光区域的 MCF 增多, 则剪切力增大, 表面粗糙度增大。

羟基铁粉粒径对表面粗糙度的影响如图 10(d)所示。不论羟基铁粉粒径为何值时, 表面粗糙度均降低, 且在羰基铁粉粒径为 48 μm 时, 表面粗糙度下降得最多。这是因为羰基铁粉粒径越大, 在磁场作用下形成的磁性簇磁力越强, 对工件表面产生的刮擦作用越强。

5.2.2 材料去除率

磁芯结构对材料去除率的影响如图 11(a)所示。随着抛光时间的增长, 材料去除率逐渐减小, 而且减小的趋势逐渐平稳。这是因为随着抛光时间的增长, MCF 的消耗和基液挥发影响抛光性能。纵向单列磁芯结构的表面粗糙度下降最快, 垂直双列磁芯结构的表面粗糙度下降最慢。

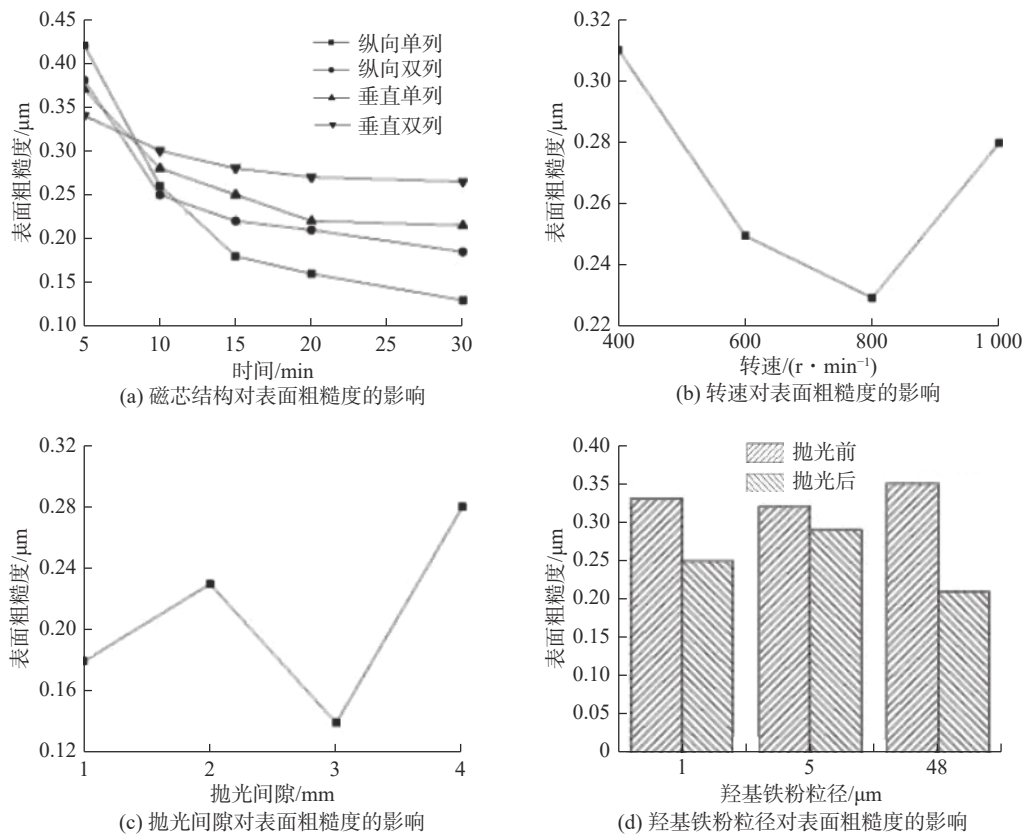


图 10 抛光参数对表面粗糙度的影响

Fig.10 Effect of polishing parameters on surface roughness

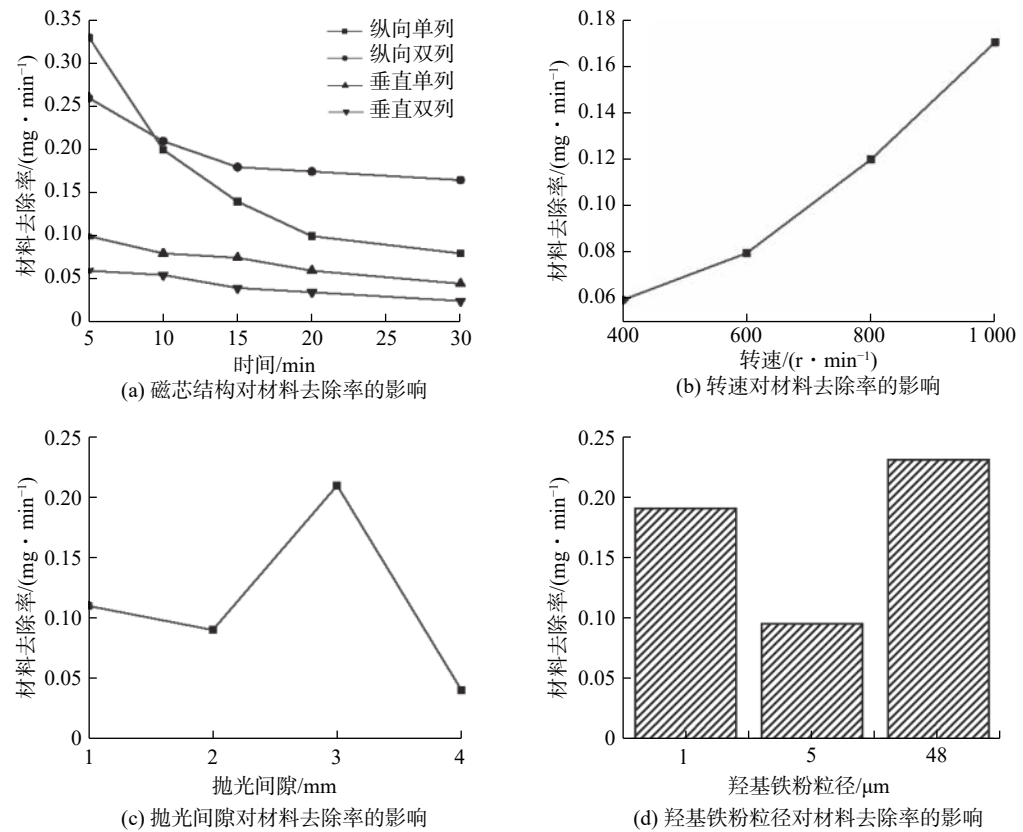


图 11 抛光参数对材料去除率的影响

Fig.11 Effect of polishing parameters on material removal rate

这是因为磁芯结构充磁面的磁场强度大于非充磁面,磁场强度增大,导致材料去除率增大。

抛光转速对材料去除率的影响如图 11(b)所示。随着转速的增大,材料去除率增大,当转速增加至 1 000 r/min 时,材料去除率达到最大值。这是因为抛光转速增大,深孔内壁与磨粒之间的相对速度增大,材料去除率增大。

抛光间隙对材料去除率的影响如图 11(c)所示。随着抛光间隙的增大,材料去除率呈先减小后增大再减小的变化趋势,在抛光间隙为 3 mm 时,材料去除率达到了最大值。这是因为抛光间隙增大,沿孔内壁的磁场强度变小,剪切力变小,抛光效果变差,材料去除率减小。但抛光间隙继续增大,MCF 抛光线速度增大,抛光效果增强,材料去除率增大。当抛光间隙增大到一定值 3 mm 时,磁场强度减小,且对抛光效果影响较大,因此,材料去除率下降。故材料去除率先减小后增大再减小。

羟基铁粉粒径对材料去除率的影响如图 11(d)所示。当羰基铁粉粒径为 48 μm 时,材料去除率达到最大值。这是因为羰基铁粉粒径增大,磁力增强,磁性簇的剪切屈服应力增大。

6 结 论

提出了基于针式抛光头的 MCF 深孔抛光方法。通过磁场仿真设计针式抛光头,建立磁场耦合模型,分析 MCF 流体的流动特性,进行 MCF 深孔抛光工艺试验研究。得出结论:

a. 仿真结果表明,纵向单列磁芯结构的 MCF 针式抛光头的磁场模分布最为均匀,且强度足够大。

b. 磁场耦合结果表明,当针式抛光头转速为 800 r/min、抛光间隙为 3 mm 时,速度与压力分布较均匀,且此时速度与压力的变化速率也较快。

c. 抛光试验结果表明,采用纵向单列磁芯结构,针式抛光头转速为 800 r/min,抛光间隙为 3 mm,羟基铁粉粒径为 48 μm 时,表面粗糙度从 0.42 μm 下降为 0.13 μm ,材料去除率为 0.025 mg/min,抛光效果最好。试验结果与仿真结果较为吻合。

参考文献:

- [1] 杨微,周威,杨力,等. 深孔加工技术研究进展 [J]. 硬质合金, 2016, 33(2): 141–146.
- [2] 彭琴,刘海华. 小直径深孔加工技术在航空机载行业中的应用 [J]. 航空精密制造技术, 2012, 48(3): 55–58.
- [3] 熊艳伦,汤佳骏,刘炜. 深孔加工技术研究综述 [J]. 现代农业装备, 2016, 34(2): 24–28.
- [4] 张晓东,韩策. 航空复杂壳体零件深孔加工技术研究 [J]. 航空制造技术, 2017(15): 50–57.
- [5] 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.
- [6] WANG Y L, WU Y B, NOMURA M. Nano-precision polishing of oxygen-free copper using MCF (Magnetic Compound Fluid) slurry[J]. *Advanced Materials Research*, 2016, 1136: 455–460.
- [7] 王续跃,吴勇波,姜健,等. 磁性复合抛光液配制及其抛光性能试验研究 [J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(6): 832–836.
- [8] 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(1/4): 253–261.
- [9] 焦黎,吴勇波,郭会茹. 磁场分布对磁性复合流体抛光材料去除率的影响 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(17): 79–84.
- [10] WANG Y L, WU Y B, NOMURA M. Fundamental investigation on nano-precision surface finishing of electroless Ni-P-plated STAVAX steel using magnetic compound fluid slurry[J]. *Precision Engineering*, 2017, 48: 32–44.
- [11] 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.
- [12] 王瑞凯,左洪福,吕萌. 环形磁铁空间磁场的解析计算与仿真 [J]. 航空计算技术, 2011, 41(5): 19–23.
- [13] 张峰,张学军,余景池,等. 磁流变抛光数学模型的建立 [J]. 光学技术, 2000, 26(2): 190–192.
- [14] 刘剑平,张新义,贾庆轩,等. 流变模型对剪切稀化流体弹流油膜厚度影响的研究 [J]. 中国机械工程, 2011, 22(20): 2415–2418.