

针式形磁性复合流体抛光工具设计及工艺试验

刘 剑, 彭 婷, 王璐璐

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2022年3月10日; 录用日期: 2022年5月3日; 发布日期: 2022年5月9日

摘 要

针对深孔内壁光整加工效率低且成本高的技术难题, 提出采用自主研发的针式形磁性复合流体 (Magnetic Compound Fluid, MCF) 抛光工具头对深孔零件进行光整加工。采用COMSOL Multiphysics对永磁铁结构进行建模仿真, 设计磁场分布均匀的针式形抛光工具头结构; 建立MCF深孔抛光的磁场模型和流场模型, 并对其进行耦合仿真, 分析流体流动特性。以黄铜H62工件为抛光对象, 开展工艺试验, 并对抛光前后工件的表面微观形貌、表面粗糙度以及材料去除率进行研究。试验结果表明: 当针式抛光工具头转速为1400 r/min, 抛光间隙为1 mm时, 获得较好的抛光效果, 有效改善了深孔内壁表面质量。同时试验结果验证了该方法的有效性, 为实现MCF深孔抛光技术奠定研究基础。

关键词

深孔零件, 磁性复合流体, 抛光, 针式形抛光工具头, 黄铜H62

Design and Process Test of Needle-Shaped Magnetic Composite Fluid Polishing Tool

Jian Liu, Ting Peng, Lulu Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 10th, 2022; accepted: May 3rd, 2022; published: May 9th, 2022

Abstract

Aiming at the technical problems of low efficiency and high cost of finishing the inner wall of deep holes, a self-developed needle-shaped Magnetic Compound Fluid (MCF) polishing tool head was proposed to finish finishing the deep hole parts. COMSOL Multiphysics was used to model and simulate the permanent magnet structure, and the needle-shaped polishing tool head structure with uniform magnetic field distribution was designed; the magnetic field model and flow field model of MCF deep hole polishing were established, and the coupled simulation was carried out to ana-

lyze the fluid flow characteristics. Taking the brass H62 workpiece as the research object, the polishing process experiment was carried out, and the surface micro-morphology, surface roughness and material removal rate of the workpiece before and after polishing were studied. The experimental results show that when the rotational speed of the needle-type polishing tool head is 1400 r/min and the polishing gap is 1 mm, a better polishing effect can be obtained and the surface quality of the workpiece is the best. At the same time, the experimental results verify the effectiveness of the method and lay a research foundation for the realization of MCF deep hole polishing technology.

Keywords

Deep Hole Parts, Magnetic Composite Fluid, Polishing, Needle-Shaped Polishing Head, Brass H62

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着光学、电子、航空航天、新能源技术等高新产业的快速发展，对深孔零件表面质量和表面形状精度的要求越来越高[1]，如石油化工方面的高压反应管、航天航空领域的各类飞行器以及国防工业中的精密枪炮等[2]。由于深孔零件特殊的几何特征，导致操作难度提高[3]，目前所常用的深孔加工技术方法难以实现高效率、高质量的可控光整加工。因此研究深孔加工技术对实现精密零件的功能具有重要意义[4]。

近年来，国内外研究学者对深孔零件加工开展了各类研究。王峻针对深孔钻削小直径的问题，研究了单管内排屑喷吸钻技术，有效改善了刀具重磨问题、提高了加工性能，并且还对 DF 钻排屑容器设计进行了改进[5]。何铮、胡凤兰针对超长长径比汽轮机转子内孔精度较低的问题，解决了加工过程中工具振动问题[6]。赵武等将磁化切削加工方法运用到了深孔零件中，该方法能减小切削力，提高了工件表面质量[7]。2003 年日本的 Shimada 等人[8]提出了一种新的抛光磁介质 - 磁性复合流体，它具有粘度较好和粒子分散稳定性较强的特性[9]，在外加磁场作用下能使其形成具有较好粘塑性的 Bingham 流体[10] [11]，并且在抛光域中形成“柔性研磨层”，不会对工件造成亚表面损伤与形变，抛光效率高[12] [13] [14]，这些优势使其较为适用于深孔零件的光整加工。

本文采用 COMSOL Multiphysics 对永磁铁结构进行建模仿真，设计磁场分布均匀的针式形抛光工具头；建立 MCF 深孔抛光的磁场模型和流场模型，并对其进行耦合仿真，分析流体流动特性。以黄铜 H62 材料为抛光对象开展工艺试验，重点研究抛光间隙对工件表面质量及材料去除率的影响。为提高深孔类零件的抛光质量提供参考依据。

2. MCF 深孔抛光原理

由于现有的 MCF 抛光头结构均是轮式抛光，该种抛光头只适用于点抛光和面抛光，不适用于孔抛光，为了能够实现孔抛光这一目的，自行研制了针式形抛光工具头，其抛光原理如下图 1。

针式形抛光工具头内的磁铁结构产生磁场，使得抛光液中磁性颗粒发生磁性链化，并逐渐链化形成磁性簇[15]。磨料粒子夹杂在磁性团簇之间，主要是对工件产生挤压、切削作用。植物纤维素作为 MCF 的一种添加剂，主要作用是增加了 MCF 的粘度。在施加磁场作用下，MCF 受磁场链化动力的影响，使得 MCF 中的磨粒与孔内壁发生相对运动，从而产生切削作用，实现对孔内壁表面的抛光加工。

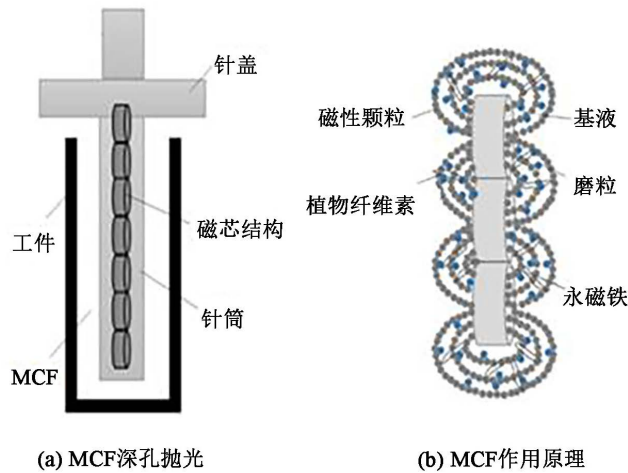


Figure 1. MCF deep hole polishing principle
图 1. MCF 深孔抛光原理

3. 针式形抛光工具的设计

针式形抛光工具头采用树脂材料，可以有效防止抛光工具头内部的磁铁对其本身产磁化作用，结合实际 MCF 深孔抛光对磁场强度的要求，抛光工具头内的磁铁选用钕铁硼 N45。

磁铁排列方式

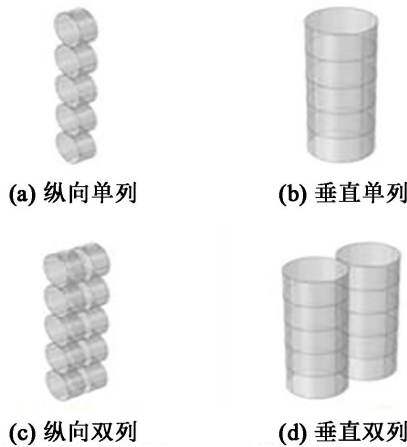


Figure 2. Arrangement of four different magnet structures
图 2. 四种不同磁铁结构排列方式

如图 2 所示，图中显示了纵向单列、纵向双列、垂直单列和垂直双列四种不同磁铁排列方式。使用 COMSOL Multiphysics 软件中的常用模块 AC/DC 中的“磁场，无电流”物理场接口来研究磁场模分布特性。设置永磁铁的直径为 3 mm，高度为 2 mm；磁铁的周围域为空气，大小设置半径为 20 mm 的球体。边界条件设为磁绝缘条件，采用标准化剖分网格，对磁铁结构进行稳态计算。

图 3 为四种不同磁铁排列方式下的孔内壁磁场模分布图，从结果上看，采用纵向排列方式的磁铁结构的磁场模均呈现出“中间大，两端小”的分布特征。采用垂直排列方式的磁铁结构的磁场模均呈现出“中间小，两端大”的分布特征。产生该种现象是因为磁铁结构在充磁方向的磁场强度要明显大于非充磁方向的磁场强度。综合比较，将采用磁铁结构为纵向单列的排列方式来设计针式形抛光工具头。

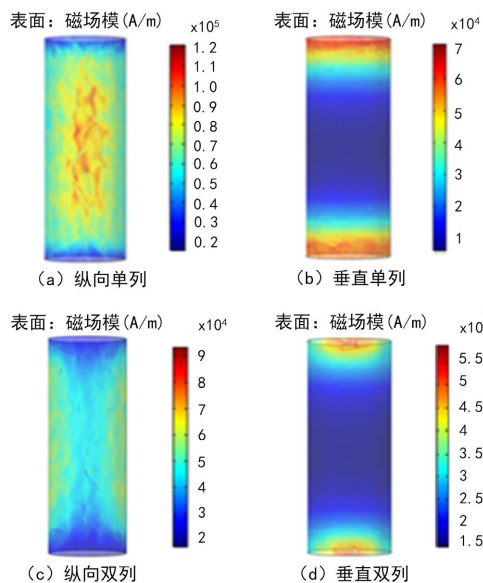


Figure 3. Distribution of the magnetic field mode on the inner wall of the hole under four different magnet arrangements

图 3. 四种不同磁铁排列方式下的孔内壁磁场模分布

4. MCF 深孔抛光数学建模

4.1. 磁场建模

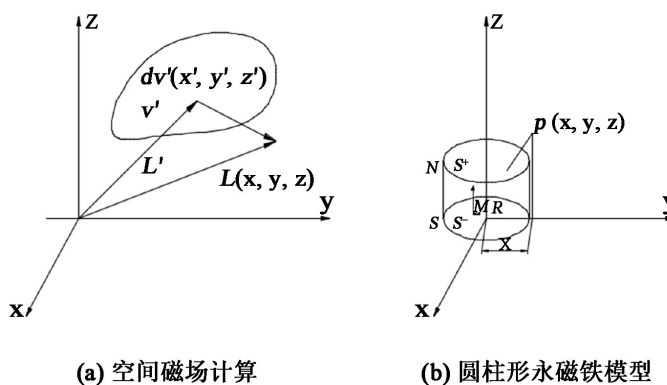


Figure 4. Magnetic field modeling

图 4. 磁场模型

图 4(a)为空间磁场计算，将其看作磁化的硬质磁介质。针对抛光工具头磁体外区域的磁化强度，考虑小磁铁为均匀磁化，根据分子电流公式可推得 V 的小磁铁在空间中产生磁感应强度为：

$$B = \frac{\mu}{4\pi} \int_{V'} \nabla \times \nabla \frac{1}{|L-L'|} dV \cdot M = Q \cdot M \quad (1)$$

式中 μ 表示真空磁导率， M 表示磁铁的磁化强度， $|L-L'| = [(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{1/2}$ ， Q 为耦合张量。

如图 4(b)为圆柱形永磁铁模型，磁铁为轴向均匀充磁，依据磁化电流理论，所以由公式(1)可推出：

$$B(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \nabla \times \nabla \times \frac{M}{R} dV = Q \cdot M \quad (2)$$

其中:

$$Q = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\nabla \times \nabla}{R} dV \quad (3)$$

由公式(3)可以计算出圆柱形永磁铁的九个分量, 其在空间中产生的磁感应强度为:

$$B_x = Q_{xx} M_x + Q_{xy} M_y + Q_{xz} M_z \quad (4)$$

$$B_y = Q_{yx} M_x + Q_{yy} M_y + Q_{yz} M_z \quad (5)$$

$$B_z = Q_{zx} M_x + Q_{zy} M_y + Q_{zz} M_z \quad (6)$$

4.2. 流场建模

采用连续性方程、动量方程和能量方程来构建 MCF 流体流动模型。由于 MCF 中采用的基液是水, 具导热性, 但抛光区域的温度不是很高, 故忽略能量方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial pu}{\partial x} + \frac{\partial pv}{\partial y} + \frac{\partial pw}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

纳维斯托克斯(N-S)方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial pu}{\partial t} + \text{div}(puu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial pu}{\partial t} + \text{div}(pvu) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial pu}{\partial t} + \text{div}(pwu) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{array} \right. \quad (8)$$

本构方程:

$$\tau_{r\theta} = \begin{cases} \tau_0 + \eta_{p0} \gamma (\tau \geq \tau_0) \\ \eta_{pr} \gamma (\tau < \tau_0) \end{cases} \quad (9)$$

式中的 η_{p0} , η_{pr} 分别为 MCF 屈服前后的粘度, γ 为剪切应变速率, $\gamma = -\frac{rdw}{dr}$ 。

连续性方程、动量方程和本构方程组成封闭的方程组, 以此来求解流体流动特性。

5. MCF 深孔抛光仿真

5.1. MCF 深孔抛光磁场仿真

图 5 为不同抛光间隙下的孔内壁磁场模分布, 图 6 为抛光间隙对磁场模的影响。随着抛光间隙增大, 磁场模在整体上呈现出逐渐下降的趋势, 在抛光间隙为 1 mm 时, 磁场模减小幅度最大。当继续增大抛光间隙, 磁场模下降幅度逐渐减小。

5.2. MCF 深孔抛光流场仿真

图 7 为抛光间隙对剪切速率的影响, 从图中可知, 剪切速率随着抛光间隙增大而减小。当抛光间隙为 1 mm 时, 剪切速率分布相对均匀且较大。

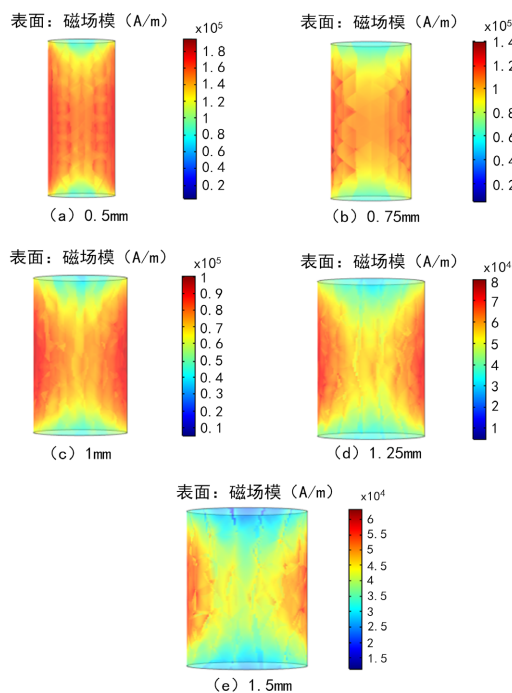


Figure 5. Distribution of the magnetic field mode on the inner wall of the hole under different polishing gaps
图 5. 不同抛光间隙下的孔内壁磁场模分布

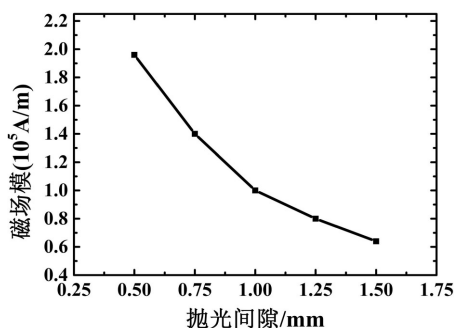


Figure 6. The influence of polishing gap on magnetic field mode
图 6. 抛光间隙对磁场模的影响

图 8 为抛光间隙对剪切速率和压力的影响，从图中可知，随着抛光间隙增大，深孔内壁剪切速率和压力均逐渐减小。当抛光间隙为 0.75 mm 时，剪切速率和压力变化最快。

6. MCF 深孔抛光试验

6.1. 抛光试验装置

如图 9 所示，为自主研制的 MCF 深孔抛光试验装置。采用树脂 9400 材料通过 3D 打印制成的针式抛光工具头，并将多个圆柱形永磁铁按纵向单列方式放置在抛光工具头中，实现针式抛光工具头所需磁场。其中针式抛光工具头直径 8 mm，磁铁尺寸直径为 3 mm，厚度为 2 mm。工件通过夹紧机构固定于工作台，试验时使针式形抛光工具头浸没在 MCF 中，通过电机带动针式形抛光工具头旋转，从而实现对工作抛光。

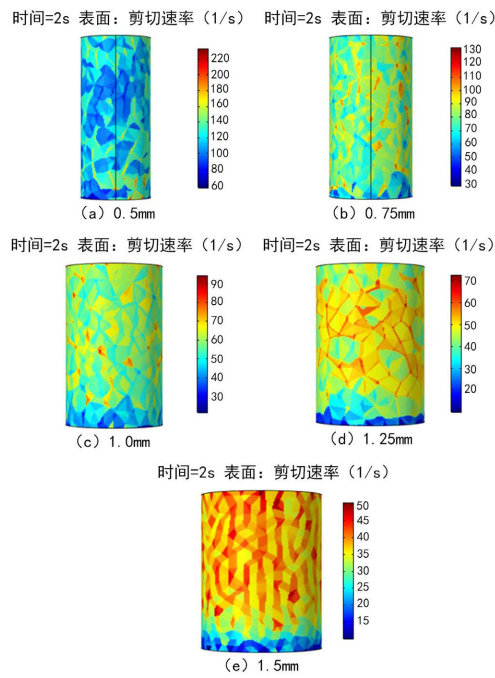


Figure 7. Effect of polishing gap on shear rate
图 7. 抛光间隙对剪切速率的影响

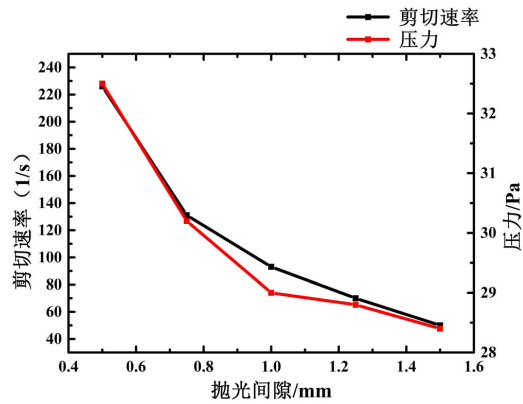


Figure 8. Effect of polishing gap on shear rate and pressure
图 8. 抛光间隙对剪切速率和压力的影响

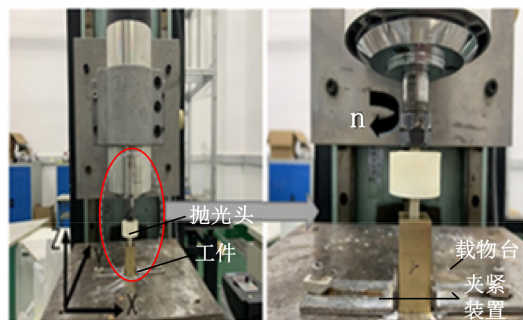


Figure 9. MCF polishing workpiece head test device
图 9. MCF 抛光工件头试验装置

6.2. 试验过程

试验中所使用的 MCF 由羰基铁粉、氧化铝磨粒、 α -纤维素以及去离子水组成，各成分分配比如表 1 所示。针式形抛光工具头直径为 8 mm，MCF 抛光试验参数如表 2 所示。在抛光过程中，要确保每次使用的 MCF 质量和抛光时间是相同的，每次抛光前后均要采用金相显微镜(M230-21BLC)观察工件表面形貌；采用粗度仪(SJ-201P)检测工件的表面粗糙度；采用精密电子称测量工件抛光前后的质量，并计算材料去除率。

Table 1. Composition of MCF

表 1. MCF 的成分

成分	比例
羰基铁粉	52 wt%
氧化铝 Al_2O_3	14 wt%
α -纤维素	3 wt%
水	31 wt%

Table 2. MCF deep hole polishing experiment parameters

表 2. MCF 深孔抛光试验参数

工艺参数	数值
羰基铁粉 M (μm)	48
时间 t (min)	10
抛光间隙 θ (mm)	0.5/0.75/1/1.25/1.5
抛光转速 V (r/min)	1400

7. 实验结果与讨论

7.1. 工件表面质量

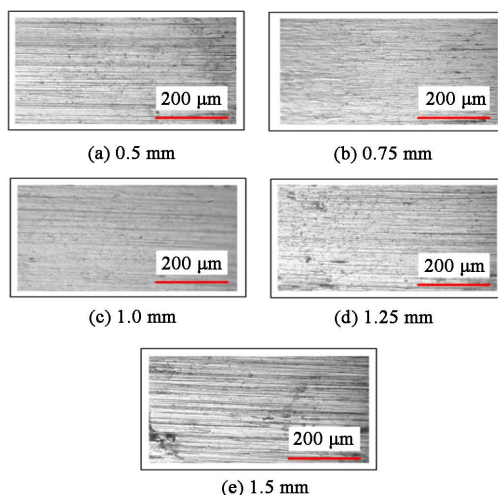


Figure 10. Effect of polishing gap on the surface morphology of workpiece

图 10. 抛光间隙对工件表面形貌的影响

图 10 中显示了不同抛光间隙 MCF 抛光后的工件表面微观形貌。随着抛光间隙增大, 工件表面形貌开始得到改善。当抛光间隙为 0.5 mm 时, 工件表面形貌得到改善, 但仍有一些划痕和凹坑存在。当抛光间隙为 0.75 mm 时, 工件表面无明显划痕, 但表面残存少量凹坑。当抛光间隙为 1 mm 时, 工件表面质量得到了显著改善, 此时工件表面形貌最佳。然而当抛光间隙继续增大时, 工件表面形貌改善效果变差, 划痕与凹坑同时存在。

7.2. 表面粗糙度

图 11 中显示了不同抛光间隙对工件表面粗糙度的影响。从图中可知: 随着抛光间隙增大, 表面粗糙度在整体上呈现出先下降后上升的变化趋势。当抛光间隙为 1 mm 时, 表面粗糙度值最小, 为 168 nm。产生该种现象的原因是: 抛光间隙的大小决定了 MCF 工作区域磨料粒子的数量, 当抛光间隙逐渐增大, 工件表面距离 h 形抛光工具头距离开始增大, 使得孔内壁的磁场强度增强, 抛光效果变好, 表面粗糙度下降显著。但当抛光间隙继续增大时, 会导致抛光间隙过大, 使得工作区域磁场强度减弱, 造成磁性颗粒对磨粒的夹持力变差, 故导致表面粗糙度上升。

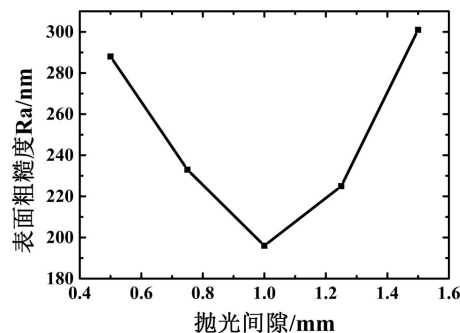


Figure 11. Effect of polishing gap on surface roughness of workpiece

图 11. 抛光间隙对工件表面粗糙度的影响

7.3. 材料去除率

图 12 中显示了抛光间隙对工件材料去除率的影响。从图中可知: 随着抛光间隙增大, 材料去除率在整体上呈现出下降的变化趋势, 当抛光间隙为 1.5 mm 时, 材料去除率达到了最小值, 为 0.35 mg/min。产生该种现象的原因是: 随着抛光间隙增大, MCF 抛光液对工件表面的抛光速度逐渐减小, 使得磨粒与深孔内壁之间的相对速度逐渐减小, 因此材料去除率降低。该试验结果也与 MCF 深孔抛光的仿真结果相吻合。

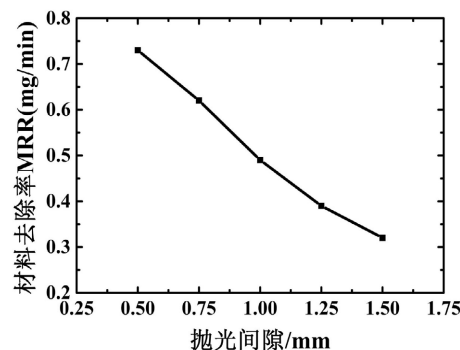


Figure 12. Effect of polishing gap on workpiece material removal rate

图 12. 抛光间隙对工件材料去除率的影响

8. 结论

本文针对深孔内壁光整加工效率低且成本高的技术难题, 提出采用自主研制的针式形磁性复合流体 (Magnetic Compound Fluid, MCF) 抛光工具头对深孔工件进行抛光试验。实验结果表明: 当针式抛光工具头转速为 1400 r/min, 抛光间隙为 1 mm 时, 获得较好的抛光效果, 有效改善了深孔内壁表面质量。试验结果验证了该方法的有效性, 下一步将重点研究针式形磁性复合流体抛光头在不同抛光工艺参数下对工件的抛光效果, 在进一步改善工件表面质量的同时, 实现深孔内壁的全面抛光, 从而为实现高效率、高质量的深孔类零件 MCF 抛光工艺技术奠定研究基础。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 何定健, 李建勋, 王勇. 深孔加工关键技术及发展[J]. 航空制造技术, 2008(21): 90-93.
- [3] 熊艳伦, 汤佳俊, 刘炜. 深孔加工技术研述[J]. 现代农业装备, 2016, 34(2): 24-28.
- [4] 张晓东, 韩策. 航空复杂合体零件深孔加工技术研究[J]. 航空制造技术, 2017(15): 50-57.
- [5] 王峻. 20 世纪深孔加工技术的兴衰及新突破——介绍 SIED 深孔加工集成技术[J]. 机械管理开发, 2004(4): 1-3.
- [6] 何铮, 胡凤兰. 利用磁化切削提高深孔零件的加工质量[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2010, 20(3): 27-29.
- [7] 赵武, 霍博义, 黄丹. BTA 深孔精密扩孔系统流体扰动的非线性横振[J]. 机械工程学报, 2020, 56(17): 155-164.
- [8] Shimada, K., Wu, Y. and Wong, Y. (2003) Effect of Magnetic Cluster and Magnetic Field on Polishing Using Magnetic Compound Fluid (MCF). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **262**, 242-247.
[https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)01497-X](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)01497-X)
- [9] Shimada, K., Akagami, Y., Fujita, T., et al. (2002) Characteristics of Magnetic Compound Fluid (MCF) in a Rotating Rheometer. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **252**, 235-237.
[https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00646-7](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00646-7)
- [10] Wang, Y., Wu, Y. and Nomura, M. (2016) Nano-Precision Polishing of Oxygen-Free Copper Using MCF (Magnetic Compound Fluid) Slurry. *Advanced Materials Research*, **1136**, 455-460.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1136.455>
- [11] 王璐璐, 姜晨, 管华双, 等. 磁性复合流体的深孔抛光工艺试验研究[J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(2): 127-133.
- [12] Guo, H. and Wu, Y. (2016) Ultrafine Polishing of Optical Polymer with zirconia-Coated Arboyl-Iron-Particle-Based Magnetic Compound Fluid Slurry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **85**, 253-261.
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7929-x>
- [13] 陈逢军, 尹韶辉, 余剑武, 等. 磁流变光整加工技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2011, 22(19): 2382-2392.
- [14] 白杨, 张峰, 邓伟杰, 等. 磁流变抛光液的配置及其抛光稳定性[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 175-182.
- [15] 李文妹, 姜晨, 许继鹏, 等. 光学玻璃磁性复合流体抛光液研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 272-279.