爪型抛光头的深孔内表面MCF抛光特性建模与 仿真

许一凡*,罗 通

上海理工大学机械工程学院,上海

收稿日期: 2025年4月28日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月29日

摘要

针对深孔内表面抛光均匀性难以控制的问题,基于磁流体的抛光技术提供了新思路。文章提出了一种由 主磁铁与三个辅助磁铁协作的抛光头,通过旋转,带动磁性复合流体(MCF)抛光液在弯管内形成可控流 场,实现内表面抛光。基于仿真平台,构建了包含抛光头运动、MCF流体动力学及深孔工件几何结构的 耦合模型,通过定义磁场 - 流场 - 固体运动的多物理场边界条件,进行仿真分析。仿真结果表明,爪型 抛光头可在深孔内产生均匀的磁场。通过分析壁面剪切应力分布,验证了爪型抛光头对MCF抛光液的驱 动效率及深孔内表面抛光的均匀性。本研究为磁控流体抛光技术在深孔加工中的应用提供了理论依据, 为抛光头结构优化与工艺参数调控奠定了基础。

关键词

爪型抛光头,磁性复合流体,深孔,多物理场耦合,仿真分析

Modeling and Simulation of MCF Polishing Flow Characteristics for Deep Hole Inner Surface Based on Claw-Type Polishing Head

Yifan Xu*, Tong Luo

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

Received: Apr. 28th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 29th, 2025

Abstract

Aiming at the challenge of controlling the polishing uniformity of deep hole inner surfaces, polishing

*通讯作者。

technology based on magnetorheological fluid offers a new solution. A polishing head composed of a main magnet and three auxiliary magnets is proposed. Through rotation, it drives the magnetic compound fluid (MCF) polishing liquid to form a controllable flow field within the elbow, enabling inner surface polishing. Based on a simulation platform, a coupled model integrating the polishing head's motion, MCF fluid dynamics, and the geometric structure of deep-hole workpieces is established. By defining multi-physical field boundary conditions for magnetic field-flow field-solid motion, simulation analysis is conducted. Results show that the claw-type polishing head can generate a uniform magnetic field inside deep holes. Analyzing the wall shear stress distribution verifies the driving efficiency of the claw-type polishing head on MCF polishing liquid and the uniformity of deep hole inner surface polishing. This study provides a theoretical foundation for applying magnetorheological fluid polishing technology in deep-hole machining and lays the groundwork for optimizing polishing head structures and regulating process parameters.

Keywords

Claw-Type Polishing Head, Magnetic Compound Fluid (MCF), Deep Hole, Multi-Physical Field **Coupling. Simulation Analysis**

Copyright © 2025 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/ ۲

(cc) **Open Access**

1. 引言

在航空航天、医疗器械等高端制造领域,深孔内表面的高精度抛光是保障设备可靠性的关键环节。 例如,航空发动机叶片小孔的内表面粗糙度需控制在 Ra 小于 0.2 µm 以下,以减少流体阻力与腐蚀风险 [1]。传统机械抛光方法依赖刚性磨头,难以适应微小深孔(L/D≥10)的复杂型面,易导致抛光盲区与过度 磨损[2]; 电化学抛光虽能实现柔性加工,但存在电解液污染、加工效率低等问题[3] [4]。

基于磁性复合流体(Magnetic Compound Fluid, MCF)的抛光技术通过外部磁场调控抛光液流动,可实 现非接触式柔性抛光,在高精度加工中展现出独特优势[5]。MCF 抛光液中均匀分散的磁性颗粒在外加磁 场作用下形成链状结构,其表观黏度随磁场强度动态可调,为精密抛光提供了可控的剪切力与压力分布 [6]。

然而,现有磁控抛光系统多依赖外置电磁铁或永磁铁构建磁场,存在结构复杂、磁场穿透深度有限、 微小空间内磁场均匀性难以控制等问题[7]。例如,范登胜[8]提出的外置磁场抛光装置在曲率变化区域的 磁场梯度误差超过 20%,导致抛光压力不均。

针对这一挑战,爪型抛光头技术通过将磁性颗粒集成于工件内部,利用机械旋转诱导可控流场,为 解决微小空间内的流体驱动问题提供了新思路。Kim 等[9]在微流控芯片中通过磁珠链旋转实现了液滴的 定向混合,证明了磁珠链对流体的高效驱动能力;Goyal 等[10]验证了磁流体在微通道内的低功耗流体特 性, 其驱动的流场均匀性误差小于 15%。

然而,上述研究主要集中于生物医学领域的微尺度液滴操控,尚未涉及工业级深孔内表面抛光中抛 光头 MCF 抛光液的耦合作用机制, 尤其是主磁体与辅助磁铁对抛光液流场、压力分布及材料去除率的影 响规律仍不明确。

针对现有技术在复杂型面抛光中的局限性,本文提出一种磁珠链抛光头结构,通过电机驱动磁珠链 旋转,在弯管内部构建螺旋推进流与涡流耦合的可控流场,实现 MCF 抛光液对弯管内表面的均匀抛光。 基于有限元仿真软件建立多物理场耦合模型,结合 Yang 等[11]提出的磁流体流变特性模型与周振锋等[12] 关于磁研磨工具的动力学分析方法,系统研究磁珠转速、弯管曲率等参数对抛光液流动特性与抛光压力 分布的影响。研究成果有望突破外置磁场的空间限制,为精密弯管内表面抛光提供高效、可控的新方法, 推动磁控流体抛光技术在高端制造领域的工程应用。

2. 模型建立

2.1. 几何模型

爪型抛光头结构的设计是实现深孔内表面均匀抛光的核心。该抛光头由主磁体与三个辅助磁体组成, 其中辅助磁铁以 120°的间隔均匀分布于主磁体周围,这种布局能够有效提高抛光效率,同时增强加工表 面剪切应力分布的均匀性。借助有限元仿真软件的几何建模工具,对抛光装置进行精确建模,确保各磁 体单元之间的空间布置合理,以形成理想的磁场分布。

在网格划分过程中,对于磁体附近及深孔壁面等关键区域,通过局部网格加密技术提高网格密度, 以准确捕捉磁场梯度变化及流体流动的细节特征。几何模型的网格划分结果如图1所示。



Figure 1. Schematic diagram of mesh generation 图 1. 网格划分示意图

2.2. 数学模型

2.2.1. 磁性复合流体动力学模型

磁性复合流体(MCF)的流动特性由包含磁体积力项的 Navier-Stokes 方程描述,该方程综合考虑了流体的惯性力、压力梯度、黏性力以及磁场对流体的作用力[13],具体形式为:

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v\right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 v + F_m \tag{1}$$

式中: ρ 为流体密度,v为流速,p为压力, η 为动态黏度。

磁体积力 F,, 由磁场梯度与磁化强度的相互作用产生,其表达式为:

$$F_m = \mu_0 \left(M \cdot \nabla \right) H \tag{2}$$

式中: μ_0 为真空磁导率,M为磁化强度,H为磁场强度。

2.2.2. 磁通连续性方程

静磁场的分布遵循 Maxwell 方程组,如式(3)磁通连续性方程表明磁场是无散场,安培环路定理描述 了电流与磁场的关系。

$$\begin{cases} \nabla \cdot B = 0, \\ \nabla \times H = J \end{cases}$$
(3)

其中: $B = \mu_0(H + M)$, J 为电流密度(抛光头线圈电流)。

2.2.3. 磁场控制方程

由连续性方程与动量方程组成:

$$\begin{cases} \nabla \cdot v = 0\\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + F_m \end{cases}$$
(4)

考虑到 MCF 抛光液的黏塑性特性,采用 Bingham 本构方程描述其剪切行为。当剪切应力 $\|\tau\|$ 超过屈服应力 τ_0 时,流体表现出塑性流动特性;当剪切应力低于屈服应力时,流体呈现固态特性,剪切速率为零。具体形式为:

$$\tau = \begin{cases} \eta_{0} \dot{\gamma} + \tau_{0} \frac{\dot{\gamma}}{\|\dot{\gamma}\|}, \|\tau\| \ge \tau_{0} \\ 0, \|\tau\| < \tau_{0} \end{cases}$$
(5)

其中: τ_0 为屈服应力; η_0 为塑性黏度; $\dot{\gamma} = \nabla v + (\nabla v)^T$ 为剪切速率张量。

2.2.4. 磁流耦合方程

磁流耦合效应通过磁场梯度对磁化强度各分量的作用体现,磁力在空间中的分布规律由以下分量方 程描述[14]:

$$\begin{cases} F_{m,x} = \mu_0 \left(M_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_x}{\partial y} + M_z \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) \\ F_{m,y} = \mu_0 \left(M_x \frac{\partial H_y}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_y}{\partial y} + M_z \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \\ F_{m,z} = \mu_0 \left(M_x \frac{\partial H_z}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_z}{\partial y} + M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \right) \end{cases}$$
(6)

该方程组清晰地表达了磁场在 x、y、z 三个方向上的梯度变化对磁体积力分量的影响,为分析 MCF 抛光液在磁场中的流动特性提供了理论基础。

2.3. 边界条件

边界条件设置包括流速边界条件、压力边界条件以及液体的接触角边界条件。根据模型的特点,本 文对微流体模型的边界条件进行了如下设置:

通道壁边界条件:深孔壁面处流体速度严格定义为零,通过默认的流体壁面边界特征自动实现,精确捕捉壁面黏滞力对流体的阻滞作用,确保壁面附近速度梯度的准确模拟。无滑移条件反映流体黏性效应,是刻画壁面附近边界层流动的关键;接触角设置优化了流固界面行为,确保多物理场耦合中流体与固体边界的相互作用符合真实物理现象,为剪切应力分布计算提供可靠边界。

磁边界条件:针对旋转机械磁场特性,通过在边界一点设定磁标量势为零,作为磁场计算的参考基准。该设置约束磁通量守恒,确保旋转部件的磁场分布严格遵循安培定律及磁介质本构关系,避免因磁势基准模糊导致的磁场计算偏差。零磁标势边界为磁场求解提供了基准参考,保证磁体旋转时磁场梯度的精确计算,是磁流耦合模型中 $F_m = \mu_0 (M \cdot \nabla) H$ 准确加载的前提。

上述边界条件协同构建了"磁场 - 流场 - 固壁"的耦合约束体系。

3. 数值仿真与结果分析

3.1. 有限元仿真软件耦合仿真设置

通过仿真软件的模型编辑接口建立模型后,确保模型的准确性和适用性。为模拟实际加工环境并观察,在加工区域外部构建了一个半径为5 cm 的球体,作为环境区域。为保证加工区域具有足够的磁场强度,装置采用饱和磁场强度高的钕铁硼稀土磁铁作为永磁体励磁。钕铁硼磁场稳定、剩余磁化强度大、 且具有良好的机械性能。在该研究中选择了剩磁感应强度较高的 N52 钕铁硼磁铁,基本性能如表1 所示, 直径为2 mm。

Table 1. The magnetic properties of N52 NdFeB permanent magnets 表 1. N52 钕铁硼永磁铁磁性能

性能 -	剩余磁感应强度 Br	矫顽力 Hcb	内禀矫顽力 Hcj	最大磁能积 BH	最高工作温度 T
	Т	KA/m	KA/m	KJ/m ³	°C
	1.44~1.48	828~907	≥876	394~414	≤70

永磁体产生的空间磁场直接影响磁流变抛光液的黏度,同时施加的磁场吸引力对流体产生体积力, 影响流场。选择径向充磁的永磁铁配置,这有利于增加磁流变抛光液对壁面的压力,提高剪切应力,并 且有助于抛光液的均匀分布,提升加工表面质量。

为工件不受到磁场影响,选择 SUS304 作为工件,这为试验提供了便利,工件内径为 4 mm。此外, 仿真中所用材料的主要参数在表 2 中列出,为仿真提供了必要的输入数据。

Table 2. Key Parameters of Simulation Materials 表 2. 仿真材料主要参数

参数	单位	MCF 抛光液	永磁体	SUS 304
相对磁导率		1.05	1	1.72
密度	kg/m ³	3030		8940
剩余磁通密度模	Т		1.45	

在物理场的定义上,采用"旋转机械,磁"接口,并选择了剩余磁通量模型和 Bingham 本构模型来描述磁流体的非牛顿特性。定义了旋转域,指定抛光头的旋转轴和旋转速度,选择 400 转/分钟作为初始转速。

在瞬态仿真中,设定仿真时间为0.8秒,确保模型旋转超过一周,以便于观察深孔表面磁场及流体特性在一个周期内的变化。

仿真的初始阶段缺乏初始条件,首先使用稳态求解器来分析由永磁体激发的稳态静磁场。这一步骤 能够获得空间磁感应强度 B 和静态流场的分布情况。随后,将稳态求解器的结果作为瞬态分析的初始条 件,进而计算每个时间步的剪切速率,有助于直观地评估加工质量。

这一模型有助于优化工艺参数,提高加工效率,而且为磁流变抛光技术的研究和应用提供了一个全 面而深入的理论基础。

3.2. 磁场密度模分析

在图 2 中,圆柱体内磁通密度分布不均匀,加工表面呈现出四条磁通密度较大的条状痕迹。0 s 时,磁通密度最低值为 0.0441 T,最高值为 0.266 T; 0.4 s 时,最低值降至 0.0403 T,最高值升至 0.291 T; 0.8 s 时,最低值为 0.0499 T,最高值为 0.282 T。在转动过程中,这些数值变动幅度较小。



Figure 2. Magnitude of magnetic field density varies with time 图 2. 磁场密度模随时间变化

同时,这四条痕迹的位置随着时间的变化在不断变换位置。该现象充分说明,在抛光头转动的过程 中,加工表面上的每一个点都能够受到近乎相同的磁力影响。从加工工艺的角度来讲,这种情况能够有 效地保证加工的均匀性,避免因磁力作用不均而导致的加工质量差异,为最终获得高质量、均一性良好 的加工表面提供了有力保障。



3.3. 剪切应力分析

如图 3 仿真结果所示,加工表面上剪切应力呈现空间非均匀分布且随时间动态演变,其分布规律与 磁通密度模呈正相关,高低应力区域相对应。验证了磁场强度变化直接影响流体动力特性,磁场驱动越 强,流体内部摩擦作用越显著,剪切应力峰值提升。表明磁场的动态变化持续调控流体速度场,进而使 剪切应力分布随时间演化,体现磁场 - 流体 - 应力的耦合作用。

这种剪切应力特性对抛光工艺具有关键意义:一方面,高剪切应力区域能强化抛光液磨粒对工件的 切削作用,而磁通密度对剪切应力分布的调控,可间接控制加工重点区域;另一方面,剪切应力随磁通 密度的时变特性,使工件表面各点在动态过程中接受均衡的剪切作用,避免局部过度加工,与磁通密度 的协同变化共同保障了抛光加工的均匀性和工艺稳定性。

3.4. 辅助磁铁速度对加工表面影响

在爪型抛光头中,辅助磁铁对于深孔内表面的加工质量也起到关键的作用。由此考虑辅助磁铁与主磁针之间转速的配合对加工表面质量的影响。为保证 MCF 流体不发生飞溅,将主磁针转速设置为 400 rad/s。而辅助磁体转速进行参数化扫描计算,从-800 rad/s 至 800 rad/s,步长为 100。



Figure 4. The influence of the rotational speed of the auxiliary magnet on the shear stress 图 4. 辅助磁体转速对剪切应力的影响

如图 4 所示,剪切应力最大值呈现"先上升 - 后下降 - 再波动上升"的复杂趋势。在辅助磁体转 速从-800 rad/s 向正向增加过程中,转速的改变直接影响磁场对 MCF 流体的驱动能力,进而改变流体 内部速度梯度。当转速为-100 rad/s 时,剪切应力最大值达到 8470 N/m²,为观测区间内的峰值,说明 该转速下磁场与流体的耦合作用最强,流体内部摩擦最剧烈。整体来看,最大值始终维持在较高水平 (6000 N/m²以上),表明辅助磁体转速对剪切应力最大值的调控作用显著,转速的微小变化即可引发流 体动力特性的明显改变。

剪切应力最小值曲线相对平稳,数值始终维持在较低区间(0~1000 N/m²)。尽管随转速变化有细微波动,但整体变化幅度远小于最大值,说明辅助磁体转速对剪切应力最小值的影响较弱,流体内部存在相对稳定的低应力区域,受转速调控的敏感度低。最小值的稳定分布则保障了加工过程中低应力区域的存在,可防止局部过度切削,与最大值共同作用,平衡材料去除效率与加工均匀性。

4. 结论

本文针对深孔内表面抛光均匀性难题,提出基于爪型抛光头的磁控流体抛光方法,并通过多物理场 耦合仿真研究相关作用机制,主要结论如下:

1) 爪型抛光头设计优势:爪型抛光头由主磁铁与三辅助磁铁组成,能在深孔内形成动态均匀磁场,加工表面磁通密度波动小于10%,避免传统外置磁场梯度误差,使抛光液剪切应力均衡作用于工件内表面。

2) 流场与剪切应力特性: 抛光头旋转带动 MCF 抛光液形成涡旋流场, 磨粒分布均匀。壁面剪切应 力峰值达 8470 N/m², 高应力区域与磁场强度正相关, 验证了磁场 - 流场耦合调控机制。剪切应力最小值 稳定在 0~1000 N/m², 平衡了材料去除效率与加工均匀性。

3) 辅助磁铁转速影响:辅助磁铁转速显著影响剪切应力最大值,在-100 rad/s 时耦合作用最强,为 工艺参数优化提供依据。而剪切应力最小值对转速不敏感,保障了加工稳定性。

该研究为深孔内表面抛光提供了磁场 - 流场协同方案,为精密部件抛光提供理论支撑,后续可结合 实验优化抛光头的结构与流体配方。

参考文献

- [1] 刘文浩, 陈燕, 李文龙, 等. 磁粒研磨加工技术的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 47-61.
- [2] Wang, J., Li, Y., Zhang, L., *et al.* (2018) Research on Precision Polishing Technology for Micro Deep Holes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **131**, 1-12.
- [3] 赵耀耀, 陈松, 李昌龙, 等. 基于多轴刀路轨迹的自由曲面磁粒研磨试验[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 319-328.
- [4] Jha, A.K., Kumar, V. and Singh, S.K. (2017) Electrochemical Polishing: A Review. *Materials & Design*, **126**, 347-363.
- [5] Wang, S., Han, W., Yu, H., Jiang, M. and He, B. (2025) Microstructure and Rheological Properties Evolution of Bi-Disperse Magnetorheological Fluids: From Three-Dimensional Particle Flow Simulation to Experiment. *Journal of Molecular Liquids*, 425, Article 127173. <u>https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127173</u>
- [6] 李毓滦, 曲禹鑫, 程海东, 等. 磁粒研磨中磁性磨料的动力学行为仿真研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(2): 107-112.
- [7] Zhang, G.Q., Wang, X.M. and Li, H. (2021) Application of Magnetic Fluid Polishing Technology in Complex Surface Machining. *Journal of Mechanical Engineering*, 57, 201-209.
- [8] 范登胜. 零件表面磁力研磨抛光中磁场特性的仿真分析[J]. 机械研究与应用, 2024, 37(3): 27-30.
- [9] Kim, S.H. and Ahn, C.H. (2018) Magnetic Bead—Based Microfluidic Mixing for Lab-on-a-Chip Devices. *Lab on a Chip*, **18**, 2051-2060.
- [10] Goyal, A. and Kim, J. (2017) Magnetic Bead—Based Microfluidic Actuation for Lab-on-a-Chip Applications. *Microm-achines*, 8, Article 368.
- [11] Ming, Y., Huang, X.M., Zhou, D.D., Zeng, Q. and Li, H.Y. (2022) Rheological Properties of Magnetic Field-Assisted Thickening Fluid and High-Efficiency Spherical Polishing of ZrO₂ Ceramics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **121**, 1049-1061. <u>https://doi.org/10.1007/s00170-022-09344-4</u>
- [12] Zhou, Z., Sun, X., Yang, Y. and Fu, Y. (2023) A Study on Using Magnetic Abrasive Finishing with a 6-Axis Robot to Polish the Internal Surface Finishing of Curved Tubes. *Coatings*, 13, Article 1179. https://doi.org/10.3390/coatings13071179
- [13] Furuya, T., Kawabata, K. and Yamamoto, K. (2015) Numerical Simulation of Magnetic Fluid Flow in a Microchannel under a Magnetic Field. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48, Article 425001.
- [14] Sato, T., Kawabata, K. and Yamamoto, K. (2017) Analysis of Magnetic Fluid Flow in a Curved Microchannel under a Magnetic field. *Microfluidics and Nanofluidics*, 21, 1-12.