

微织构磁性复合流体抛光的流场仿真建模分析

许世炜, 陈飞昊

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年5月13日; 录用日期: 2025年6月6日; 发布日期: 2025年6月13日

摘要

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics)方法因其在流场分析中的广泛应用而被广泛认可。CFD仿真能够提供详细的流场信息, 帮助提高材料去除效率和表面质量。因此, 本章将利用COMSOL Multiphysics有限元软件对MCF抛光液的运动特性进行研究。材料去除率作为一个关键的性能指标, 不仅影响加工效率, 还与加工表面质量相关。在材料去除率的理论基础下, 可知抛光压力和抛光速度是影响材料去除率的两个因素。传统抛光工件表面相对平整、不存在微结构特征, 使得抛光过程中的速度和压力分布较为一致。然而, 微织构工件由于其表面存在微结构阵列特征, 使得抛光过程中的速度和压力分布呈现出非均匀性, 对材料去除率会产生影响。因此, 借助有限元仿真对速度和压力分布进行模拟, 帮助理解微织构抛光过程中的材料去除行为。通过有限元仿真, 分析在不同的抛光间隙和抛光转速条件下, MCF抛光液的流速分布和压力分布以及剪切速率情况。为后续进行MCF微织构抛光试验提供指导与参考依据。

关键词

微织构, 速度分布, 压力分布, 材料去除率

Flow Field Simulation and Modeling Analysis of Micro-Textured Magnetic Compound Fluid Polishing

Shiwei Xu, Feihao Chen

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

Received: May 13th, 2025; accepted: Jun. 6th, 2025; published: Jun. 13th, 2025

Abstract

The method of Computational Fluid Dynamics (CFD) has garnered widespread recognition due to

its extensive application in fluid flow analysis. CFD simulations are capable of providing detailed information about fluid flow fields, thereby facilitating enhanced material removal efficiency and surface quality. Consequently, this chapter employs the COMSOL Multiphysics finite element software to investigate the flow characteristics of MCF (Magnetic Compound Fluid) polishing fluid. Material removal rate, as a pivotal performance indicator, not only influences the efficiency of the machining process but is also intrinsically linked to the surface quality of the workpiece. Based on the theoretical foundation of material removal rate, it is evident that polishing pressure and polishing speed are two factors that affect the material removal rate. Traditional polished workpieces, characterized by relatively flat surfaces devoid of microstructural features, exhibit uniform distributions of speed and pressure during the polishing process. However, micro-textured workpieces, which possess microstructural arrays on their surfaces, display non-uniform distributions of speed and pressure during polishing, thereby affecting the material removal rate. Therefore, finite element simulations are utilized to model the distributions of speed and pressure, aiding in the comprehension of material removal behavior in micro-textured polishing processes. Through finite element simulations, the velocity and pressure distributions of the MCF polishing fluid, as well as the shear rate, are analyzed under different polishing gap and polishing speed conditions. This provides guidance and a reference for subsequent MCF micro-textured polishing experiments.

Keywords

Micro-Texture, Velocity Distribution, Pressure Distribution, Material Removal Rate

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/>



Open Access

1. 引言

随着现代精密加工技术的不断发展,对复杂表面和微结构的高精度抛光需求日益增长[1]。磁性复合流体抛光作为一种新兴的柔性加工技术,因其结合了磁流变效应与流体的柔性特性,展现出在微纳结构表面处理中的独特优势[2]。该技术通过磁场调控磁性流体的流动行为,实现对复杂表面的均匀接触和高效材料去除,尤其适用于微织构表面的精密加工。然而,磁性复合流体在抛光过程中的流动特性、微织构表面的相互作用机制仍需深入研究。传统实验方法在揭示复杂流场分布规律和优化工艺参数方面存在局限性,因此,借助数值仿真工具对抛光过程中的流场进行分析成为一种有效的手段。

本文基于 COMSOL Multiphysics 平台,对微织构表面磁性复合流体抛光过程中的流场分布进行仿真分析[3]。通过建立包含微织构几何特征的三维模型,结合磁流体动力学理论,模拟磁性流体在磁场作用下的流动行为,研究微织构几何参数、磁场强度及流体特性对流场分布的影响规律[4]。研究结果不仅为优化磁性复合流体抛光工艺参数提供理论依据,也为微织构表面的高效加工提供了新的技术思路[5]。通过数值仿真与实验验证相结合的方法,本研究旨在为磁性复合流体抛光技术在精密制造领域的应用奠定基础。

2. COMSOL 流场仿真分析

2.1. 流场仿真数学模型

本节将采用 COMSOL Multiphysics 软件对 MCF 流动流场与磁场的耦合进行建模。MCF 是一种新型的功能流体,它既具有流体物质的流动性又具有固体磁性材料的磁性。在无磁场时呈现液体状态,在磁

场的作用下发生固态到液态转变, 磁性微粒迅速链化, 呈现为类固体状态, 表现出非牛顿流体的力学特性。MCF 抛光研究过程属于不可压缩连续流动, 故而需满足流体流动连续方程和动量守恒方程[6]。

流体流动的连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

在上述方程中, ρ 代表密度, t 代表时间, u 代表速度, 而矢量 u 、 v 、 w 分别表示速度矢量 u 在 x 、 y 和 z 方向上的分量。

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho u U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v U) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w U) \right) &= \left(u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} + w \frac{\partial U}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_U \\ \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho u V) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v V) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w V) \right) &= \left(u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_V \\ \frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho u W) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v W) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w W) \right) &= \left(u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} + w \frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_W \end{aligned} \quad (2)$$

在这些方程中:

ρ 是流体的密度, U 、 V 、 W 分别是速度向量 $u = (U, V, W)$ 在 x 、 y 、 z 方向上的分量, p 是流体的压力, S_U 、 S_V 、 S_W 分别是广义源项在 x 、 y 、 z 方向上的分量, 包括体积力或其他影响动量的外力, u 、 v 、 w 是速度向量 u 的分量。

湍动能标准 k 方程:

$$\frac{\partial u_i k}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = P_r - \varepsilon \quad (3)$$

紊动能耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial u_i \varepsilon}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \nu_t \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_r - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (4)$$

式(4)中, x_i 表示笛卡尔数学坐标系, u_i 表示沿 i 方向的速度分量, ν 表示液体的运动粘度。 P_r 表示紊动能生成率, 表达式为:

$$P_r = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

ν_t 是湍流的涡动粘度(也称为湍流粘性系数), u_i 和 u_j 分别是速度向量 u 在 i 和 j 方向上的分量, x_i 和 x_j 是笛卡尔坐标系中的坐标。公式(5)表示了湍流中, 由于速度梯度的存在, 流体的粘性导致能量从平均流动转移到湍流涡旋中, 从而生成湍动能。公式中的 $(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$ 是速度梯度张量的对称部分, 它描述了流体的剪切变形。整个表达式乘以涡动粘度 ν_t 来计算单位体积内湍动能的生成率。

2.2. COMSOL 仿真模型的建立

建立微结构几何参数模型, 微结构几何参数如表 1 所示, 微结构几何形状如图 1。

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n S_{\text{结构}jk}}{S_{\text{工件}}} = \frac{n^2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}{m^2} = \frac{\left(\frac{m}{l} \right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}{m^2} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d}{l} \right)^2 \quad (6)$$

β 为织构面积率, n 为织构数量, m 为工件尺寸, j, k 表述第 j 行第 k 列, l 为阵列间距, d 为织构直径, 面积率仅与直径和阵列间距有关。

本文的微织构工件因其存在周期性, 故仿真只分析一个周期单元上的速度场分布和压力分布。如图 2 所示。

Table 1. Exture parameter table
表 1. 织构参数表

织构参数	数值
圆形微织构直径	50 μm
织构深度	50 μm
阵列间距	100 μm
织构面积率	19.635%

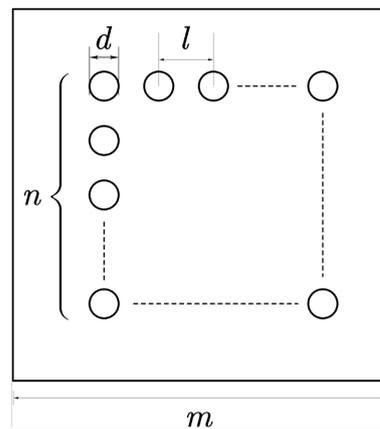


Figure 1. Micro-textured array
图 1. 微织构阵列

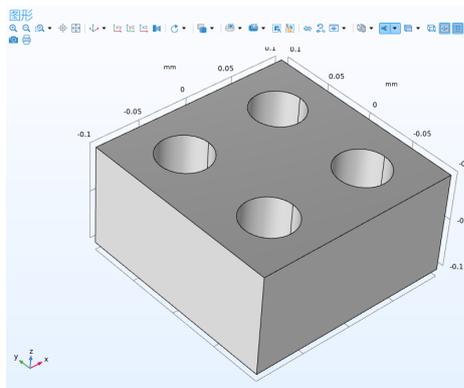


Figure 2. Establishment of texture models
图 2. 织构模型的建立

完成模型的绘制后, 接下来, 我们将从材料库中选择合适的材料属性。而铝合金微织构工件的材料则为铝合金(aluminum)。我们将 MCF 卧式抛光头的转速设定在 300 至 900 转每分钟(rpm)之间。流体的属性被定义为具有 10 千帕(kPa)的屈服应力和 1360 千克每立方米(kg/m^3)的密度。

并对这些表面的单元进行更细密的划分, 以提高有限元仿真的精度, 如图 3。

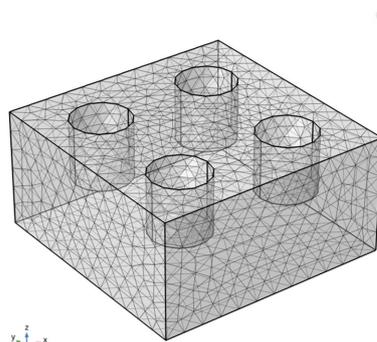


Figure 3. Mesh generation

图 3. 网格划分

在边界条件方面, 我们假设流体是不可压缩的, 并在微织构表面上应用无滑移边界条件。卧式抛光头的边界条件被设置为逆时针旋转, 其速度与无滑移边界条件相同。此外, 我们假设加工对象没有漏磁或渗透等缺陷。在本研究中, 我们假设 MCF 的流动是层流, 并选择 CFD 模块下的“旋转机械, 层流”接口来计算流体域和边界条件。

2.3. 微织构抛光速度场分析

为了研究不同工艺参数对 MCF 流场的影响, 需要建立多个模型, 将卧式抛光头的转速设置为 300 rpm~900 rpm, 每间隔为 200 rpm, 抛光间隙设置为 1 mm, 的四个模型进行分析。

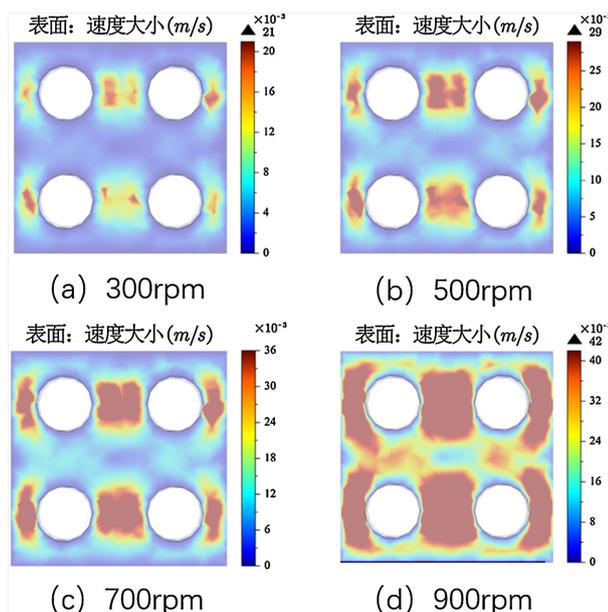


Figure 4. The influence of polishing speed on velocity field distribution

图 4. 不同抛光转速对速度场的影响

从图 4 中可以看出, 当抛光间隙为 1 mm 时, 不同抛光转速下的速度场分布表现出以下特点和变化趋势: 抛光转速为 300 rpm 时: 速度场分布较为均匀, 流体在微织构区域的流动速度相对较低。速度的

最大值出现在微结构的边缘, 表明流体在这些区域受到较大的剪切力。流体的速度范围为 0 到 21×10^{-3} m/s, 标尺显示速度分布较为集中, 整体流动较为平稳, 抛光转速增加到 500 rpm 时: 速度场分布开始出现局部不均匀性, 尤其是在微结构的边缘区域, 速度梯度显著增大。速度的最大值仍出现在微结构的边缘, 但整体速度范围扩展至 0 到 35×10^{-3} m/s, 表明流体的流动速度加快, 且速度分布的离散性增强。

抛光转速为 700 rpm 时: 速度场分布的不均匀性进一步加剧, 流体在微结构区域的流动速度显著增加。速度的最大值仍集中在微结构的边缘, 且速度梯度更加明显, 表明流体在这些区域的剪切力进一步增大。流体的速度范围仍为 0 到 35×10^{-3} m/s, 但速度变化更加显著, 分布的离散性进一步增强。抛光转速增加到 900 rpm 时: 速度场分布变得非常不均匀, 流体在微结构区域的流动速度显著加快, 且速度梯度变化较大。速度的最大值仍出现在微结构的边缘, 但整体速度范围进一步扩展至 0 到 42×10^{-3} m/s, 表明流体的流动速度进一步加快。标尺显示速度分布的离散性显著增强, 速度变化更加剧烈。如图 5 所示为抛光转速对速度场大小的影响。

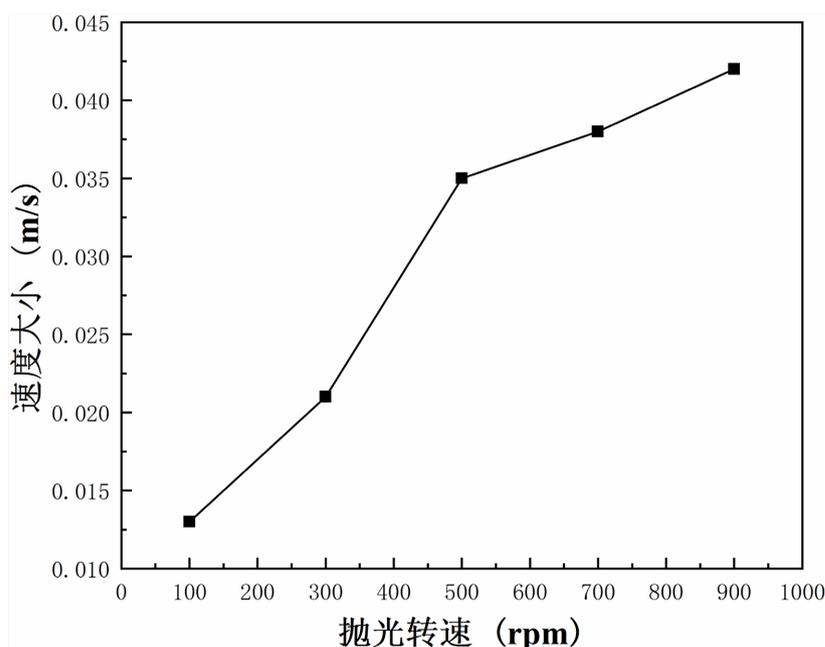


Figure 5. The influence of polishing speed on velocity magnitude
图 5. 抛光转速对速度大小的影响

2.4. 微结构抛光压力场分析

从图 6 中可以看出, 当抛光间隙为 1 mm 时, 不同抛光转速下的压力场分布表现出以下特点和变化趋势:

抛光转速为 300 rpm 时: 压力场分布较为均匀, 压力值主要集中在微结构区域的边缘。压力范围为 1×10^3 Pa 到 6×10^3 Pa, 压力分布较为集中, 表明流体在低转速下受到的剪切力较小, 压力变化较为平稳。抛光转速增加到 500 rpm 时: 压力场分布开始出现局部不均匀性, 尤其是在微结构的边缘区域, 压力值显著增大。压力范围扩展到 1×10^3 Pa 到 8×10^3 Pa, 压力分布的离散性增强, 表明流体在这些区域受到更大的剪切力, 压力梯度开始显现。

抛光转速为 700 rpm 时: 压力场分布的不均匀性进一步加剧, 压力值在微结构边缘区域显著集中, 且压力范围扩展到 1×10^3 Pa 到 10×10^3 Pa。压力分布的离散性进一步增强, 表明流体在高转速下受到的

剪切力更大, 压力梯度更加明显。抛光转速增加到 900 rpm 时: 压力场分布变得非常不均匀, 压力值在微织构边缘区域达到最大值(约 11×10^3 Pa), 且压力梯度变化显著。压力范围扩展到 1×10^3 Pa 到 11×10^3 Pa, 压力分布的离散性显著增强, 表明流体在高转速下受到的剪切力进一步增大, 压力变化更加剧烈。

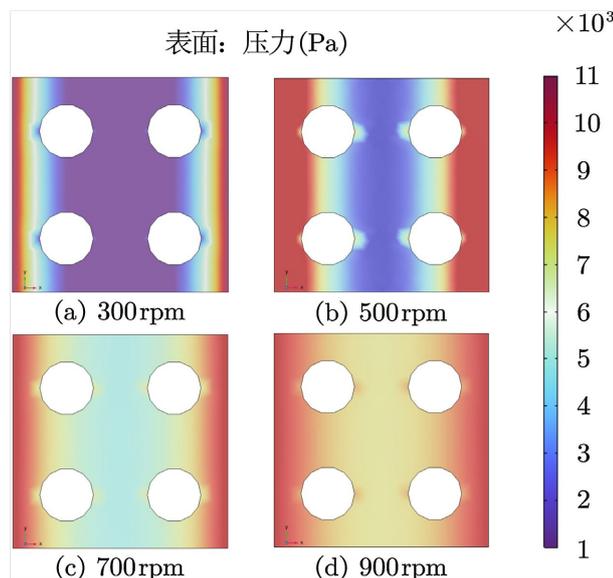


Figure 6. Pressure field distribution at different polishing speeds
图 6. 不同抛光转速下的压力场分布

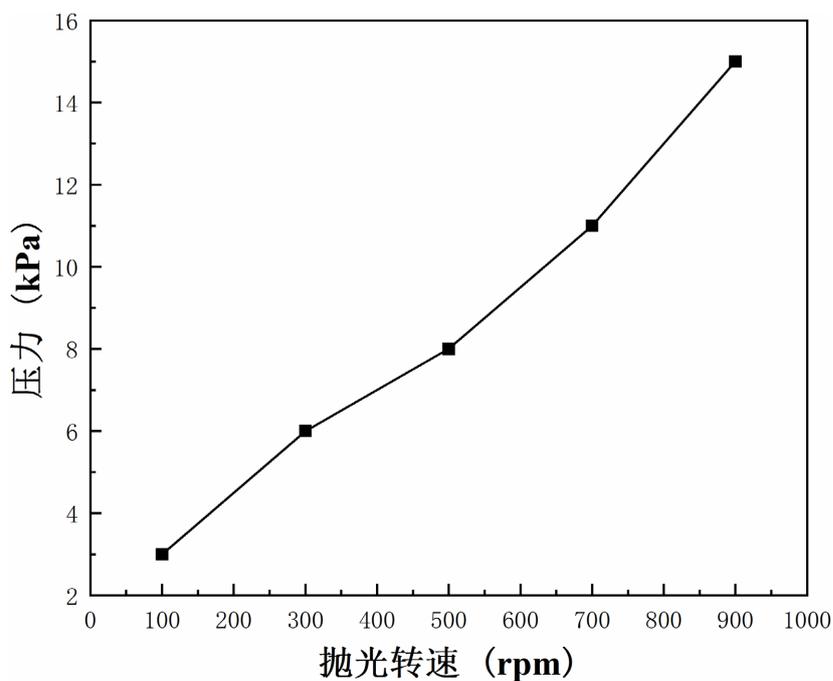


Figure 7. The influence of polishing speed on pressure
图 7. 抛光转速对压力的影响

如图 7 为不同转速下的压力场分布折线图。从压力增长趋势来看, 随着转速的增大, 速度逐渐增大, 在转速为 900 rpm 时, 压力达到了最大。

随着抛光转速的增加, 压力呈线性增长趋势。压力从低转速 100 rpm 时的约 3 kPa 逐渐增加到高转速 900 rpm 时的约 15 kPa。在低转速范围内, 压力随转速的增加变化较为显著, 曲线斜率较大, 表明压力对转速的变化较为敏感。在高转速范围内, 压力随转速的增加仍然呈上升趋势, 但曲线斜率略有减缓, 表明压力的增长速率趋于稳定。

3. 微织构抛光材料去除模型

材料去除数学模型的建立

MCF 微织构抛光技术的材料去除原理在本质上和传统抛光轮是一致的, 都是机械和化学综合作用的结果, 为了研究影响深孔工件表面材料去除率的因素, 作出如下假设:

(1) 假设 MCF 深孔抛光的材料去除主要是机械作用的结果, 依靠磨料粒子在接触表面形成一定的压力与相对速度, 从而达到对待加工表面的切削作用;

(2) MCF 中的磁性颗粒形状为圆形;

(3) 卧式抛光头与待加工工件表面之间的“柔性研磨层”中的链状结构均匀且稳定。

由 Preston 方程[7]:

$$\text{MRR} = \text{KPV} \quad (7)$$

式(7)中, K 为 Preston 系数, 由试验测试得出, P 为抛光压力, V 为抛光速度。磁流变抛光中, 抛光压力 P 是一个较为复杂的参数, 抛光过程中主要由流体流动产生的动压力、磁流变液在磁场中产生的磁化压力、磁辅助抛光液的重力造成的压力组成[8]。

$$P = P_m + P_d + P_g \quad (8)$$

式(8)中, P_d 为流体动压力, P_m 为磁化压力, P_g 为重力作用下产生的压力。相较于磁化压力 P_m , 和流体动压 P_d 抛光液重力作用下产生的压力 P_g 较小, 可以忽略。对于磁辅助抛光液在磁场下产生的磁化压力, 其表达式为:

$$P_m = \mu_0 \int_0^H M_f dH \quad (9)$$

式(9)中, μ_0 为真空中磁导率, M_f 为磁辅助抛光液的磁化强度, H 为外加磁场强度。其中, 磁辅助抛光液的磁化强度 M_f 为[9]:

$$M_f = 3\phi\mu_f \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)中可得到磁化压力, ϕ 为磁辅助抛光液中磁性颗粒的体积比浓度, μ_f 为基载液的磁导率, μ_p 为磁性颗粒的磁导率, 得到 P_m :

$$P_m = 3\phi\mu_0\mu_f \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f} \int_0^H H dH \quad (11)$$

最终得到材料去除率 MRR 为式(12)

$$\text{MRR} = K \left(P_d + 3\phi\mu_0\mu_f \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f} \int_0^H H dH \right) V \quad (12)$$

首先计算普雷斯顿系数 k , 根据试验, 由尺寸为 $20 \times 20 \times 3$ mm 的铝合金工件为实验元件进行磁流变抛光。具体条件为: $h_0 = 1$ mm, $V = 0.314$ m/s、 $\eta_0 = 14.546$ Pa·s、 μ_0 是真空磁导率为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m,

$\mu_p = 1500\mu_0$, μ_p 是磁性颗粒磁导率, μ_f 是基载液的磁导率约等于 μ_0 , 的磁性微粒在磁流变抛光液中所占的体积比是 $\phi = 0.33$, H 为磁场强度, 用高斯计测得 $H = 2.54 \times 10^7$ A/m, 由公式(11)

$$\begin{aligned} P_m &= 3\phi\mu_0\mu_f \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f} \int_0^H H dH \\ &= 3 \times 0.33 \times (4\pi \times 10^{-7})^2 \times \frac{1499}{1502} \times \frac{1}{2} \times (2.54 \times 10^7)^2 \\ &= 5.032 \times 10^2 \end{aligned} \quad (13)$$

磁化压力为 5.032×10^2 Pa, 由于磁化压力仅与磁场强度和抛光液的磁导率有关, 且在后续实验中均采用同种抛光液和磁铁, 故磁化压力在后续实验中为定值。

流体动压 P_d 和速度 V 均通过仿真得到, 带入普雷斯顿方程, 通过试验测得铝合金质量前后变化为 0.06 mg/min。求解得到 k 值为 4.87×10^{-4} 。

即可得到抛光微织构过程中的去除函数[10], 见式(14)

$$\text{MRR} = 4.87 \times 10^{-4} (P_d + 5.032 \times 10^2) V \quad (14)$$

将抛光转速和仿真做出的流体动压力带入上式(14)得到了微织构抛光的理论去除函数

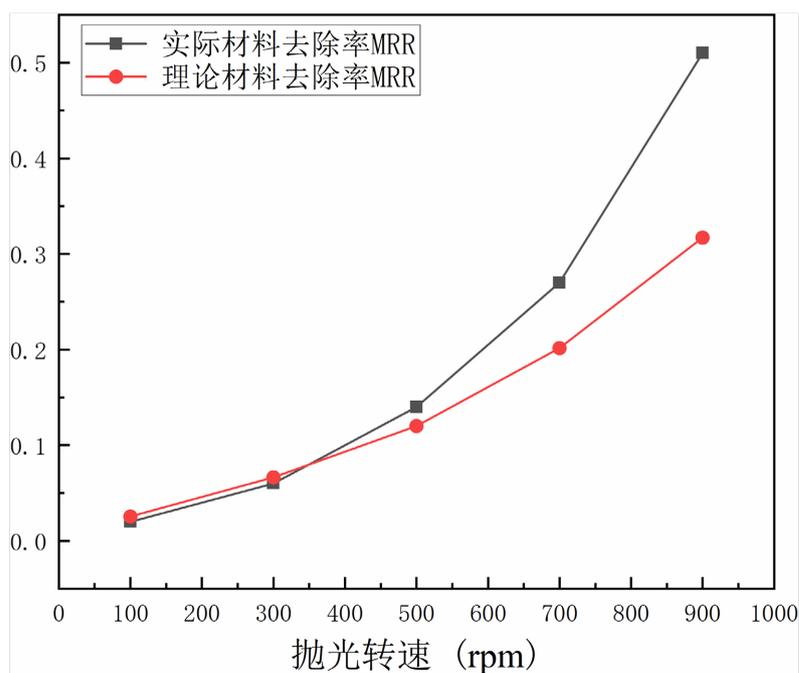


Figure 8. Material removal rate verification

图 8. 材料去除率验证

从图 8 可以看出, 理论材料去除率和实际材料去除率随抛光转速的变化趋势基本一致, 表明理论模型能够较好地反映实际抛光过程中的材料去除规律。理论曲线和实际曲线均呈现出随着抛光转速增加, 材料去除率逐渐增大的趋势。这表明抛光转速对材料去除率具有显著影响, 且理论模型能够有效捕捉这一变化规律。

在低转速范围内, 理论曲线与实际曲线的吻合度较高, 表明理论模型在低转速下的预测精度较高。此时, 材料去除率的变化较为线性, 理论值与实际值的偏差较小。在高转速范围内, 实际材料去除率略

高于理论值,但两者的变化趋势仍保持一致。这可能是由于实际抛光过程中存在一些未被理论模型完全考虑的因素,如流体的湍流效应或微织构的几何复杂性。

4. 结论

本研究通过计算流体力学(CFD)方法,借助 COMSOL Multiphysics 有限元软件对磁性复合流体(MCF)抛光液在微织构表面抛光过程中的流场分布进行了深入的仿真分析,主要结论如下:

随着抛光转速的增加,速度场和压力场分布逐渐变得不均匀。在低转速下,速度场和压力场分布较为均匀,而在高转速下,速度和压力在微织构边缘区域显著增加,形成明显的梯度变化。

速度场的最大值始终出现在微织构的边缘区域,且随着转速的增加,速度范围从低转速时的 0 到 21×10^{-3} m/s 扩展到高转速时的 0 到 42×10^{-3} m/s。

压力场的最大值也集中在微织构边缘区域,且随着转速的增加,压力范围从低转速时的 1×10^3 Pa 到 6×10^3 Pa 扩展到高转速时的 1×10^3 Pa 到 11×10^3 Pa。

基于 Preston 方程建立的材料去除模型表明,材料去除率随抛光转速的增加而显著增加,且理论模型与实验结果在低转速范围内吻合度较高。抛光压力和抛光速度是影响材料去除率的关键因素,其中抛光转速对材料去除率的影响尤为显著。

本研究通过数值仿真与实验验证相结合的方法,仿真方法得到的理论材料去除率曲线与实际曲线的吻合度较高,尤其是在低转速区域,验证了仿真方法的可靠性。这一结果表明,通过 COMSOL 流场仿真和材料去除率建模,可以为后续工艺试验提供可靠的理论指导。揭示了磁性复合流体抛光过程中速度场和压力场的分布规律,以及抛光转速对材料去除率的影响机制,为磁性复合流体抛光技术在精密制造领域的应用奠定了坚实的基础。

参考文献

- [1] 高继博. 磁性复合流体抛光机理及其使用寿命研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [2] 王有良, 高熙淳, 张文娟, 等. 磁性复合流体抛光过程中水分对抛光性能的影响[J]. 光学精密工程, 2023, 31(24): 3559-3569.
- [3] 刘剑, 彭婷, 王璐璐. 针式形磁性复合流体抛光工具设计及工艺试验[J]. 建模与仿真, 2022, 11(3): 498-507.
- [4] 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.
- [5] 曾亚维, 陈立宇, 杨夏明, 等. 表面微织构改善摩擦性能的研究进展[J]. 工具技术, 2016, 50(5): 3-7.
- [6] 姜晨, 张瑞, 郝宇. 微沟槽周期结构表面的磁性复合流体微纳光整研究及实验教学装置应用[J]. 上海理工大学学报, 2019, 41(1): 84-88.
- [7] Wang, R., Xiu, S., Sun, C., *et al.* (2021) Study on Material Removal Model by Reciprocating Magnetorheological Polishing. *Micromachines*, 12, Article 413. <https://doi.org/10.3390/mi12040413>
- [8] 李中会. 磁流变抛光工艺优化及关键技术研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2010.
- [9] 张云, 冯之敬, 赵广木. 磁流变抛光工具及其去除函数[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 190-193.
- [10] 彭小强, 戴一帆, 李圣怡. 磁流变抛光的材料去除数学模型[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 67-70.