



·惯性约束聚变物理与技术·

# 基于 Kahan 线性化快速计算梯度磁场下磁流变 抛光区域抛光粉沉降特性\*

杨 航<sup>1</sup>, 张 帅<sup>1</sup>, 张云飞<sup>2,3</sup>, 黄 文<sup>2,3</sup>, 何建国<sup>2</sup>

(1. 遵义师范学院工学院, 贵州 遵义 563006; 2. 中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900;  
3. 中国工程物理研究院 超精密加工技术重点实验室, 成都 610200)

**摘 要:** 针对抛光粉沉降特性数值计算这一超大规模非线性问题, 基于 Kahan 线性化解决了超大规模流固耦合计算问题。研究了以羟基铁粉和硅油为主要成分组合而成的抛光粉多相流在梯度磁场下抛光区域的沉降特性。以质量分数 70%、粒径 5  $\mu\text{m}$  的羟基铁粉和粘度为 0.973 Pa·s 的硅油组合而成的抛光粉为研究对象, 实现了不同的抛光轮转速、不同嵌入深度以及不同羰基铁粉质量分数情况下的沉降规律分析。结果发现: 磁流变抛光区域的抛光粉会随着抛光轮转速的增大而增多; 当到达出口时, 抛光粉的分布趋于稳定状态; 抛光粉会随着嵌入深度的增加而增多并存在饱和区; 羟基铁粉的质量分数以非线性的方式影响沉降能力。

**关键词:** Kahan 方法; 磁流变抛光; 多相流; 梯度磁场; 沉降规律

中图分类号: TH164

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210353

## Fast calculation of polishing powder sedimentation characteristics in magnetorheological polishing area under gradient magnetic field based on Kahan linearization

Yang Hang<sup>1</sup>, Zhang Shuai<sup>1</sup>, Zhang Yunfei<sup>2,3</sup>, Huang Wen<sup>2,3</sup>, He Jianguo<sup>2</sup>

(1. School of Engineering, Zunyi Normal University, Zunyi 563006, China;

2. Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

3. Key Laboratory of Ultra-precision Processing Technology, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610200, China)

**Abstract:** The sedimentation characteristics of the magnetic polishing liquid in the magnetorheological polishing area is an important part of the material removal mechanism in the polishing process. Aiming at the ultra-large-scale nonlinear problem of numerical calculation of polishing powder sedimentation characteristics, this paper solves the ultra-large-scale fluid-structure interaction calculation problem based on Kahan linearization. The sedimentation characteristics of the multiphase flow of polishing powder composed of hydroxy iron powder and silicone oil in the polishing area under gradient magnetic field were studied. Taking the polishing powder composed of hydroxyl iron powder with mass fraction of 70% and particle size of 5  $\mu\text{m}$  and silicone oil with viscosity of 0.973 Pa·s as the research object, sedimentation analysis of different polishing wheel rotation speeds, different embedding depths and different mass fractions of carbonyl iron powder were realized. It is found that the polishing powder in the magnetorheological polishing area will increase with the increase of the rotating speed of the polishing wheel; when it reaches the outlet, the distribution of the polishing powder tends to be stable; the polishing powder will increase with the increase of the embedded depth and there is a saturation zone; the mass fraction of hydroxy iron powder affects the sedimentation ability in a non-linear manner.

**Key words:** Kahan method, magnetorheological polishing, multiphase flow, gradient magnetic field, sedimentation law

\* 收稿日期: 2021-08-16; 修订日期: 2022-04-01

基金项目: 国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项“巨型激光装置光学元件超精密制造系统示范工程”课题项目(2017ZX04022001); 贵州省基础研究计划项目(黔科合基础-ZK[2021]一般 272); 遵义市科技局科技研发项目(遵市科合 HZ 字 [2020]21 号)

联系方式: 杨 航, yhangde@qq.com。

强激光武器系统对光学元件的表面精度以及表面完整性要求越来越高。应用磁流变抛光技术对光学材料进行确定性加工得到了越来越多的重视<sup>[1]</sup>。磁流变抛光(MRF)在现代科技中有着不可忽视的作用<sup>[2]</sup>,是电磁学、力学、化学等多个科学理论综合而形成的一种应用于光学元件表面加工的技术。在梯度磁场下<sup>[3]</sup>,磁流变抛光溶液会发生流变现象并在抛光区域形成一种具有黏性的凸起<sup>[4]</sup>,这种柔性好的凸起快速与工件做相对运动,工件表面受到一定的剪切力,从而实现了磁流变抛光的工作,使得光学元件表面被良好地去除并提高加工精度和改善光学表面的纹理<sup>[5]</sup>。为了提高抛光粉的质量,很多情况下会添加一定量的各种添加剂。在不加磁场时,磁流变液中的磁性颗粒将会受到阻尼力、排斥力、范德华力、布朗力和重力,由于范德华力和布朗力比较小可以忽略不计<sup>[6]</sup>,此时抛光粉的沉降主要由重力等影响。磁流变液置于梯度磁场中时,磁流变液中的磁性颗粒会受到磁力的影响,并且磁力将作为抛光粉沉降的主要影响因素。抛光粉在抛光区域的沉降往往会由于抛光粉中磁性颗粒的粒径不同或者硅油含量不同导致抛光粉在抛光区域的分布产生很大差异。目前磁流变抛光粉沉降的研究已较为成熟,但只是研究了磁流变抛光粉在一定液体中的沉降稳定性。王弘义等基于动力学模拟了磁流变液沉降模拟方法<sup>[7]</sup>。尹韶辉等研发一种高精高效单晶碳化硅表面抛光技术<sup>[8]</sup>。金宝炎等在磁性颗粒含量及制备工艺相同的情况下发现以CH-1D超分散剂为表面改性剂制备的磁流变液的磁流变性能和沉降稳定性均明显优于以油酸为表面改性剂的磁流变液<sup>[9]</sup>。唐欣等介绍了提高磁流变抛光液弥散粒子沉降稳定性的措施<sup>[10]</sup>。胡林等改善了粗大颗粒悬浮液体的沉降稳定性<sup>[11]</sup>。白杨等基于对分散体系稳定性的研究,配制出了适合于光学加工的水基磁流变抛光液<sup>[12]</sup>。然而对于目前国际科研中在磁流变抛光区域抛光粉的沉降特性研究还很匮乏。其难点在于两方面:(1)缺乏有效的实验手段与技术;(2)开展数值计算难以克服超大规模颗粒耦合计算的非线性难题。磁流变抛光粉作为磁流变抛光技术的核心之一<sup>[13-15]</sup>,在抛光区域的沉降稳定性对于光学元件表面加工以及磁流变抛光技术的发展具有良好的前景<sup>[16-18]</sup>。本文基于对抛光粉沉降特性的分析,建立抛光区域抛光粉沉降过程参数化模型,利用线性化快速数值方法开展对多种工艺条件下的沉降特性分析与计算。

## 1 抛光粉沉降特性快速计算方法

### 1.1 抛光粉的沉降机理

根据动力学分析,磁流变抛光粉沉降过程中羟基铁粉会受到磁力、阻尼力、范德华力、布朗力和重力等的影响,由于在磁流变抛光中,范德华力、布朗力太小,所以可以忽略不计,因此只需要考虑磁力、重力和阻尼力。两个磁性颗粒的中心线平行于磁场方向且相互接触时所受的磁力 $F_0$ ,其表达式为

$$F_0 = \frac{3\mu_0 M^2}{2\pi(2R)^4} \quad (1)$$

式中: $\mu_0$ 为真空磁导率; $M$ 为磁矩, $M=V\chi H$ ,其中, $V$ 为磁性颗粒的体积; $\chi$ 为磁化率; $H$ 为磁场强度; $R$ 为磁性颗粒的半径。磁性颗粒即羟基铁粉所受的重力为所有颗粒的总和 $F_g$ ,其表达式为

$$F_g = (m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n)g \quad (2)$$

式中: $m_1, m_2, m_3, m_n$ 为磁性颗粒的质量; $g$ 为重力加速度。由于羟基铁粉基本为球状,所以运用斯托克斯公式计算阻尼力 $F_v$ ,其表达式为

$$F_v = 3\pi\eta d\Delta u \quad (3)$$

式中: $\eta$ 为基液的运动粘度; $d$ 为磁性颗粒的粒径; $\Delta u$ 为磁性颗粒与基液的速度差。磁流变抛光粉会随着抛光轮的转动在抛光区域发生沉降,这种沉降会因为抛光粉成分的不同以及羟基铁粉颗粒的形状不同在抛光区域中分布时出现不同的现象。具体来讲,水、硅油的黏度会阻碍抛光粉颗粒的沉降过程。黏度越大沉降越不明显。颗粒的形状与体积也会被分为更有利于沉降和不利于沉降的两类。

### 1.2 抛光区域抛光粉沉降的参数化模型

抛光粉在抛光区域沉降的主要原因是由于在梯度磁场下,磁流变抛光区域的抛光粉中磁性颗粒受到磁力、阻尼力和重力的作用。通过抛光区域抛光粉的质量分数来表征抛光粉的沉降规律并将质量分数定义为 $w$ ,如图1所示。抛光液沿着 $y$ 方向流动。

$$w = \frac{v_b}{v_a} \quad (4)$$

式中: $v_b$ 为抛光区域抛光粉的体积; $v_a$ 为整个抛光区域的体积。抛光粉的质量分数通过抛光粉在抛光区域的体积

以及整个抛光区域的体积来计算。假设抛光区域抛光粉颗粒之间的间隙无限小,则抛光粉的体积可以定义为 $v_b$ ,

$$v_b = v(v_1, v_2, v_3, \dots, v_n) \quad (5)$$

式中: $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ 为每个磁性颗粒的体积。单个抛光颗粒的体积决定了抛光粉宏观整体的体积。 $v_{(1,2,3,\dots,n)} = \frac{4}{3}\pi r^3$ ,  $r$ 为磁性颗粒的半径。整个抛光区域的体积可以定义为 $v_a$ ,

$$v_a = \frac{4}{3}\pi xyz \quad (6)$$

式中: $x, y, z$ 分别为椭球体的三个半轴长。

### 1.3 Kahan 线性化求解

抛光粉颗粒的初始位置根据磁流变抛光几何关系给出,初始速度可以根据麦克斯韦-玻耳兹曼速度分布给出速度分布函数 $f(v)$ ,为

$$f(v) = c \exp\left[-\frac{1}{kT}\left(\frac{mv^2}{2} + V(x)\right)\right] \quad (7)$$

式中: $c$ 为常数, $K$ 为玻耳兹曼常数, $v$ 为速度, $V(x)$ 为体系相互作用势场。力场 $F$ 为

$$F = -\nabla V \quad (8)$$

根据牛顿运动方程可以求解每个时刻位置与速度。其非线性耦合采用 Kahan 方程进行线性化。对于式(9)形式的微分方程组,采用固定中心迭代。

$$\dot{x} = f(x) \quad (9)$$

其中

$$f(x) \triangleq A(x) + B(x) + C \quad (10)$$

式中: $A, B, C$ 分别为 $n$ 维二次型矩阵、 $n$ 维方阵、 $n$ 维列矩阵。采用固定中心迭代后,式(9)变为

$$x_{t+1} = x_t + s[A(x_{t+1}, x_t) + B(x_{t+1}, x_t) + C(x_{t+1}, x_t)] \quad (11)$$

式中: $t$ 为迭代步次, $s$ 为步长。显然,该积分方法是对称和线性隐式的。将式(8)进行线性化,可以开展线性化计算。

## 2 抛光粉沉降特性计算

### 2.1 抛光粉的沉降的实验设计

对于磁流变抛光来说,只要针对不同的材料的特性配制出相应的抛光粉就能应用于各类光学元件表面的抛光,但要实现抛光粉在磁流变抛光中与各类工艺的有效协同却没有那么容易。配制磁流变抛光粉是作为抛光的一项必不可少的工作,这项工作直接决定了抛光效果、材料去除以及抛光质量的关键。然而要获得良好的抛光效果,就必须对抛光粉在抛光区域的沉降进行分析。

现有的技术中,磁流变抛光都是基于轮式为主。在磁流变抛光工艺中,设计抛光轮时,必须要考虑到抛光轮的曲率、转速和光学元件嵌入深度等问题。在这些因素的影响下,抛光粉在抛光区域的沉降规律各不相同。这就为不同的光学元件表面去除提供了可参考的数据。

本文首先主要针对同一曲率、同一平面和抛光轮不同转速下的抛光粉的沉降规律进行实验分析;然后针对同一曲率、同一平面、同一抛光轮转速和不同嵌入深度下的抛光粉的沉降规律进行实验分析;最后针对同一曲率、同一平面、同一抛光轮转速、同一嵌入深度和不同质量分数下的抛光粉的沉降规律进行实验分析。

本文所用物理参数如表1所示。对于抛光断带厚度为1.5 mm以上时,同抛光轮转速具体如表2所示。表2中抛光粉的质量分数都为70%,设计的抛光轮曲率半径为300 mm,抛光轮的转速从初始的100 r/min以25 r/min为间隔增到275 r/min。

在曲率直径为300 mm下的抛光轮的不同嵌入深度如表3所示。表3中以曲率直径为300 mm设计的抛光轮,以0.05 mm为一个嵌入深度区间作为间隔设计了8组不同嵌入深度的抛光轮模型,所有嵌入深度在抛光区域均呈现出椭圆形。表2中羟基铁粉的质量分数为70%,抛光轮转速为150 r/min作为不变条件。

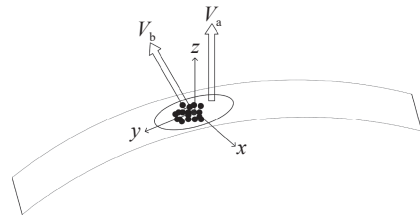


Fig. 1 Schematic diagram of polishing powder sedimentation in the magnetorheological polishing area

图1 磁流变抛光区域抛光粉沉降示意图

表 1 实验物理参数

Table 1 Experimental physical parameters

particle diameter/ $\mu\text{m}$	air-silicon soil tensor/N	silicone oil viscosity/ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	silicone oil density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	import and export pressure/Pa	radius of curvature of the polishing wheel/mm
5	0.04	0.973	0.94	101 325	150

表 2 抛光轮不同转速参数

Table 2 Different speed parameters of polishing wheel

mass fraction/%	embedded depth /mm	polishing rotation /r/min
70	1.1	100
70	1.1	125
70	1.1	150
70	1.1	175
70	1.1	200
70	1.1	225
70	1.1	250
70	1.1	275

表 3 不同嵌入深度参数

Table 3 Different embedding depth parameters

mass fraction/%	polishing rotation/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	embedded depth $h/\text{mm}$
70	150	0.65
70	150	0.70
70	150	0.75
70	150	0.80
70	150	0.85
70	150	0.90
70	150	0.95
70	150	1.00

本文针对由羟基铁粉和硅油配制而成的抛光粉在抛光区域的沉降规律进行实验分析。具体数据如表 4 所示  $w_0$  为初始配置的羟基铁粉质量分数。

表 4 中八组抛光粉的配比中, 硅油的粘度均为  $97.3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , 羟基铁粉的粒径均是  $5 \mu\text{m}$ , 质量分数从初始的 20% 开始, 以 10% 为一个间隔增到 90%。

## 2.2 抛光粉的沉降模型的选择

由于本文研究的磁流变抛光粉是由羟基铁粉和硅油配制而成, 属于三相流, 因此在模型的选择上用到欧拉模型 (Eulerian-Models)。欧拉模型属于欧拉法处理包含多种流体的连续介质模型, 其中两种及以上流体共用一组动量方程, 计算域中各流体的体积分数在每个计算单元上被追

踪。通过引进相体积分数这一变量, 实现了对每一个计算单元的相界面的追踪。在每个控制容积内所有变量及其属性在控制容积内各相共享, 并且代表了容积平均值。这样, 在任何给定控制容积体内的变量及其属性纯粹的代表了一相或者相的混合, 并且由体积分数来决定。

体积分数是欧拉模型中非常重要的一个物理量, 在任何一个网格内或控制体中某一种流体占整个流体的体积比。当体积分数等于 0 时, 这个控制体里没有这种流体。当体积分数为 1 时, 说明这个控制体里充满了这种流体。若第  $i$  相流体体积分数为  $a_i$ , 有以下 3 种情况: (1)  $a_i = 0$ : 单元体里不存在第  $i$  相流体; (2)  $a_i = 1$ : 单元体里充满了第  $i$  相流体; (3)  $0 < a_i < 1$ : 单元体里包含了第  $i$  相流体和其他流体。

体积分公式如下

$$a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n = 1 \quad (12)$$

式中:  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  分别为流体中各相的体积分数。说明在使用欧拉模型计算时流体中的各相不相溶, 而本文中的磁流变抛光粉中羟基铁粉与硅油也不相溶, 可以使用欧拉模型计算。

## 3 不同因素对抛光粉沉降特性计算结果及分析

### 3.1 抛光轮转速对抛光粉沉降的影响

在磁流变抛光工作过程中, 抛光轮的转速对磁流变抛光的有效进行产生影响。本文设计了八组抛光轮转速对抛光区域抛光粉沉降影响的实验。在抛光区域的嵌入深度为  $1.1 \text{ mm}$ , 羟基铁粉的粒径为  $5 \mu\text{m}$ , 质量分数为 70% 等

相同的条件下，抛光轮的转速依次为 100 r/min、125 r/min、150 r/min、175 r/min、200 r/min、225 r/min、250 r/min、275 r/min。图 2 为在不同的抛光轮转速对磁流变抛光区域抛光粉的沉降的影响的仿真结果图。其在抛光区域主要采用云图进行表示，体现的是同一抛光区域内不同位置的沉降特性分布，图因此没有绝对的横纵坐标进行表示，只考虑其分布规律与特性。图 3 是基于实验时不同转速对抛光斑中轴线上抛光粉沉降影响的数据， $w$  为沉降的羟基铁粉的质量分数。其实验参数如表 2 所示。其横轴表示的是抛光斑从入口到出口的实际位置。

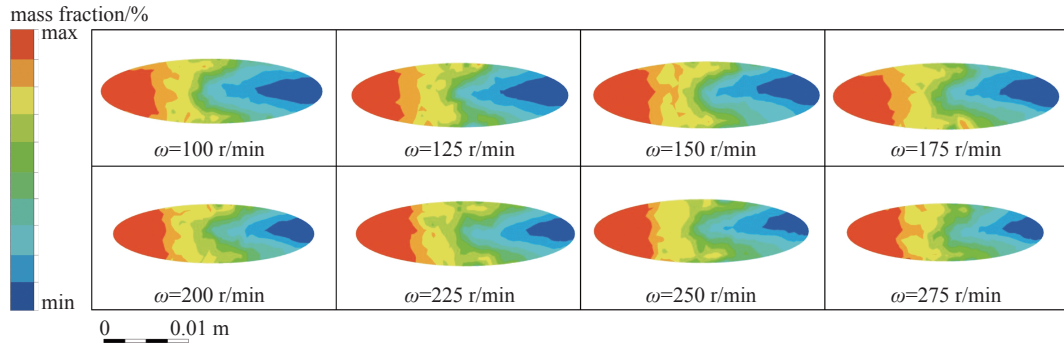


Fig. 2 Sedimentation distribution cloud diagram of the polishing powder in the polishing area when the rotating speed  $\omega$  of the polishing wheel is 100 r/min to 275 r/min

图 2 抛光轮转速  $\omega$  在 100 r/min 至 275 r/min 时抛光区域抛光粉的沉降分布云图

从图 2、图 3 中可以看出，在不同的抛光轮转速下，磁流变抛光区域抛光粉的沉降的分布呈现出明显的规律。当抛光轮的转速从 100 r/min 增到 275 r/min 时，磁流变抛光区域的抛光粉会随着抛光轮转速的增大而增多；当到达出口时，抛光粉的分布趋于稳定的状态。从曲线的线性和走向可以看出，当转速比较低时，抛光粉在抛光区域的质量分数增加得比较缓慢；在中段时，随着转速不断增大，抛光粉在抛光区域的质量分数增加得最快，但是在尾段中可以看到抛光粉的质量分数处于稳定值。与实际的抛光过程比较起来，这一结果符合抛光轮转速对抛光粉沉降特性的影响。

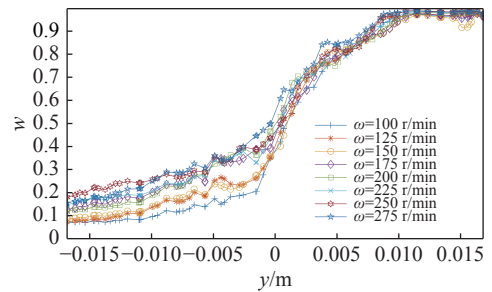


Fig. 3 Influence of the polishing wheel speed on the deposition of polishing powder in the polishing area

图 3 抛光轮转速对抛光区域抛光粉沉降的影响规律

### 3.2 同一平面嵌入深度不同对抛光粉沉降的影响

在磁流变抛光工作过程中，抛光区域的嵌入深度对磁流变抛光工艺的有效进行产生影响。本文设计了八组抛光轮嵌入深度对抛光区域抛光粉沉降影响的实验。在抛光轮的转速为 150 r/min、羟基铁粉的粒径为 5  $\mu\text{m}$  和质量分数为 70% 等相同的条件下，抛光区域的嵌入深度依次为 0.65、0.70、0.75、0.80、0.85、0.90、0.95、1.00 mm。图 4 为在不同的光学元件嵌入深度对磁流变抛光区域抛光粉的沉降的仿真结果图。图 5 是基于实验时不同嵌入深度对抛光斑中轴线上抛光粉沉降影响的数据。实验参数如表 3 所示。

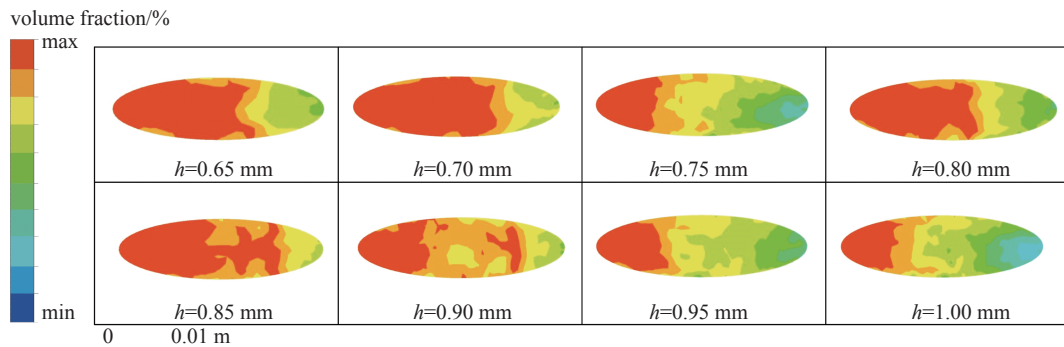


Fig. 4 Sedimentation distribution cloud diagram of the polishing powder in the polishing area when the embedding depth  $h$  of polishing powder is between 0.65 mm and 1.00 mm

图 4 抛光粉嵌入深度  $h$  在 0.65 mm 至 1.00 mm 时抛光区域抛光粉的沉降分布云图

从图4、图5中可以看出,在不同的嵌入深度下,磁流变抛光区域抛光粉的沉降的分布呈现出明显的规律:当抛光轮的嵌入深度从0.65 mm 增到 0.85 mm 时,磁流变抛光区域的抛光粉会随着抛光轮浸入深度的增大而增多;当嵌入深度到达 0.90 mm 时,抛光粉的分布出现了变化,但最后趋于稳定值。从曲线的线性和走向可以看出:当嵌入深度较小时,抛光粉在抛光区域的质量分数呈现一定的线性增加;在中段时,随着浸入深度不断增大,抛光粉在抛光区域的质量分数开始趋于稳定,但是在尾段中可以看到深度越大,抛光粉的质量分数增值越小。与实际抛光过程相比,这一结果符合抛光粉沉降特性对浸入深度的演绎规律。

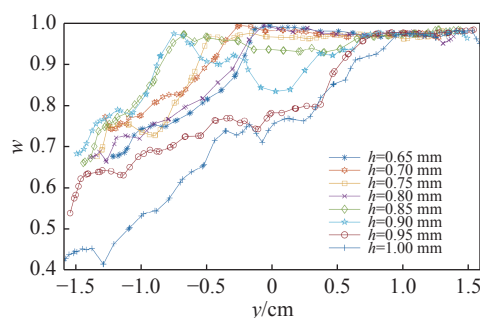


Fig. 5 Influence of embedding depth on the sedimentation of polishing powder in the polishing area

图5 嵌入深度对抛光区域抛光粉沉降的影响规律

### 3.3 羟基铁粉的质量分数对抛光粉沉降的影响

在磁流变抛光工作过程中,羟基铁粉的质量分数对磁流变抛光工艺的有效进行产生影响,本文设计了8组羟基铁粉质量分数对抛光区域抛光粉沉降的实验。在抛光轮的转速为 150 r/min,羟基铁粉的粒径为 5 μm,抛光区域嵌入深度为 1.1 mm 等相同的条件下,羟基铁粉的质量分数依次为 20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%。图6为在不同的羟基铁粉质量分数  $w_0$  对磁流变抛光区域抛光粉的沉降的仿真结果图。图7是基于实验时不同羟基铁粉质量分数对抛光斑中轴线上抛光粉沉降影响的数据。

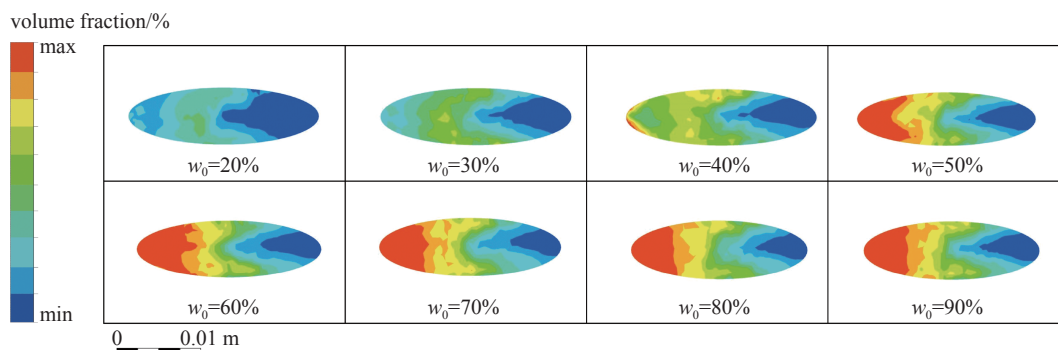


Fig. 6 Sedimentation distribution cloud diagram of the polishing powder in the polishing area when the mass fraction  $w_0$  of the hydroxy/iron powder is 20% to 90%

图6 羟基铁粉的质量分数  $w_0$  在 20% 至 90% 时抛光区域抛光粉的沉降分布云图

从图6、图7中可以看出,看出在羟基铁粉的不同质量分数下,磁流变抛光区域抛光粉的沉降的分布呈现出明显的规律:当羟基铁粉的质量分数从 20% 增到 40% 时,磁流变抛光区域的抛光粉的分布会随着羟基铁粉质量分数增大先增加然后减少;当质量分数到达 50% 时,抛光粉的分布出现了变化,随着羟基铁粉质量分数的增加先增加再减少然后又增加一次最后减小;当质量分数到达 60% 时,磁流变抛光区域的抛光粉会随着羟基铁粉质量分数增大而增加,最后趋于一个稳定值。从曲线走向可以看出,当羟基铁粉的质量分数较小时,抛光粉在抛光区域的质量分数增加;在抛光斑入口到出口中段时,随着羟基铁粉的质量分数不断增加,抛光粉在抛光区域的质量分数出现峰值,但是在尾段逐渐减小;当羟基铁粉的质量分数比较大时,抛光粉的质量分数最终趋于稳定值。与实际过程相比,这一结果符合羟基铁粉质量分数对沉降特性的影响规律。

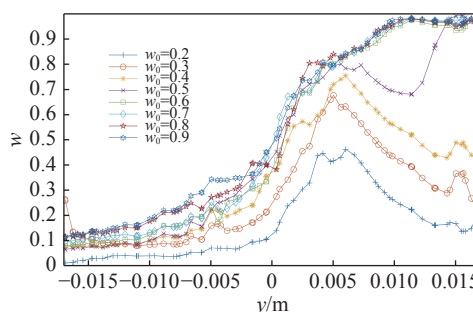


Fig. 7 Influence of the mass fraction of hydroxyl iron powder on the sedimentation of polishing powder in the polishing area

图7 羟基铁粉的质量分数对抛光区域抛光粉沉降的影响规律

## 4 结 论

本文基于 Kahan 方法对磁流变抛光区域抛光粉的沉降特性进行数值计算,得出了抛光轮转速、抛光区域嵌入

深度、以羟基铁粉和硅油配制而成的抛光粉中羟基铁粉质量分数对磁流变液抛光区域抛光粉沉降特性的影响规律。主要结论如下:(1)基于 Kahan 方法实现了超大规模抛光粉体系非线性耦合的快速、鲁棒计算;(2)发现抛光轮转速、抛光区域嵌入深度、羟基铁粉的质量分数的增加都会使磁流变抛光区域抛光粉的沉降分布最终实现饱和;(3)发现抛光区域的嵌入深度为 1.1 mm、羟基铁粉的粒径为 5  $\mu\text{m}$ 、质量分数为 70% 的条件下,当抛光轮的转速从 100 r/min 增到 275 r/min 时,磁流变抛光区域的抛光粉会随着抛光轮转速的增大而增多,当到达出口时,抛光粉的分布趋于饱和状态;(4)当抛光轮的嵌入深度从 0.65 mm 增到 0.85 mm 时,磁流变抛光区域的抛光粉会随着抛光轮转速的增大而增多,当嵌入深度到达 0.90 mm 时,抛光粉的分布趋于稳定;(5)羟基铁粉的质量分数从 20% 增加到 40% 时,磁流变抛光区域的抛光粉沉降率会随着羟基铁粉质量分数增大先增加然后减少,当质量分数到达 50% 时,随着羟基铁粉质量分数的增加呈现非线性波动,当质量分数到达 60% 时,磁流变抛光区域的抛光粉沉降率会在线性增加后趋于稳定值。

### 参考文献:

- [1] 康桂文. 磁流变抛光技术的研究现状及其发展[J]. *机床与液压*, 2008, 36(3): 173-175,182. (Kang Guiwen. Research and development of magnetorheological finishing[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008, 36(3): 173-175,182)
- [2] 王嘉琪, 肖强. 磁流变抛光技术的研究进展[J]. *表面技术*, 2019, 48(10): 317-328. (Wang Jiaqi, Xiao Qiang. Research progress of magnetorheological polishing technology[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(10): 317-328)
- [3] 张峰, 余景池, 张学军, 等. 对磁流变抛光技术中磁场的分析[J]. *仪器仪表学报*, 2001, 22(1): 42-44,48. (Zhang Feng, Yu Jingchi, Zhang Xuejun, et al. Analysis of magnetic field used in magnetorheological finishing[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(1): 42-44,48)
- [4] 路家斌, 宾水明, 阎秋生, 等. 磁场分布对多磨头磁流变抛光材料去除的影响[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(4): 20-26. (Lu Jiabin, Bin Shuiming, Yan Qiusheng, et al. Effect of magnetic field distribution on material removal in magnetorheological finishing with multiple polishing heads[J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(4): 20-26)
- [5] 姜涛. 高效气囊抛光中频误差控制路径规划[J]. *广东化工*, 2020, 47(19): 58-60. (Jiang Tao. Path planning of mid-spatial frequency control in high efficiency bonnet polishing[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(19): 58-60)
- [6] 顾勇兵, 张云, 王于岳, 等. 磁流变抛光液沉降稳定性的研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2013, 33(5): 27-30,34. (Gu Yongbing, Zhang Yun, Wang Yuyue, et al. Study on the sedimentation stability of magnetorheological fluid[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2013, 33(5): 27-30,34)
- [7] 王弘义, 罗一平, 纪东升, 等. 基于动力学模拟的磁流变液沉降模拟方法[J]. *农业装备与车辆工程*, 2020, 58(12): 51-55. (Wang Hongyi, Luo Yiping, Ji Dongsheng, et al. Simulation method of MR fluid settlement based on dynamic simulation[J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2020, 58(12): 51-55)
- [8] 尹韶辉, 邓子默, 郭源帆, 等. 单晶碳化硅的电磁场励磁大抛光模磁流变抛光[J]. *表面技术*, 2020, 49(10): 309-315. (Yin Shaohui, Deng Zimo, Guo Yuanfan, et al. Magnetorheological polishing using large polishing tool excited by electromagnetic field for silicon carbide wafer[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(10): 309-315)
- [9] 金宝炎, 包小倩, 张茂才, 等. 表面改性对磁流变液稳定性和磁流变性能的影响[J]. *磁性材料及器件*, 2007, 38(4): 51-54. (Jin Baoyan, Bao Xiaoqian, Zhang Maocai, et al. Effect of surface modification on the stability and magnetorheology of magnetorheological fluids[J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2007, 38(4): 51-54)
- [10] 唐欣, 凌虹, 胡克鳌. 磁流变液沉降稳定性研究现状与趋势[J]. *磁性材料及器件*, 2004, 35(3): 5-8. (Tang Xin, Ling Hong, Hu Keao. Current status and future trends of research in subsidence stability of magnetorheological fluids[J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2004, 35(3): 5-8)
- [11] 胡林, 付伟, 张朝平, 等. 磁流变液沉降稳定性改进及对流变性能的影响[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2001, 18(3): 176-181. (Hu Lin, Fu Wei, Zhang Chaoping, et al. Modification of the subsidence stability in magnetorheological fluids and influence of profiles on rheological[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Science)*, 2001, 18(3): 176-181)
- [12] 白杨, 张峰, 邓伟杰, 等. 磁流变抛光液的配制及其抛光稳定性[J]. *光学学报*, 2014, 34: 0416001. (Bai Yang, Zhang Feng, Deng Weijie, et al. Preparation of magnetorheological polishing fluid and its polishing stability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34: 0416001)
- [13] Kumar M, Singh Yadav H N, Kumar A, et al. An overview of magnetorheological polishing fluid applied in nano-finishing of components[J]. *Journal of Micromanufacturing*, 2021, 2021: 25165984211008173.
- [14] Ghosh G, Sidpara A, Bandyopadhyay P P. Experimental and theoretical investigation into surface roughness and residual stress in magnetorheological finishing of OFHC copper[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 288: 116899.
- [15] Arora K, Singh A K. Theoretical and experimental investigation on surface roughness of straight bevel gears using a novel magnetorheological finishing process[J]. *Wear*, 2021, 476: 203693.
- [16] Gopinath B, Sathishkumar G K, Karthik P, et al. A systematic study of the impact of additives on structural and mechanical properties of magnetorheological fluids[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 37: 1721-1728.
- [17] Lu Qi, Choi K, Nam J D, et al. Magnetic polymer composite particles: design and magnetorheology[J]. *Polymers*, 2021, 13: 512.
- [18] Shen Jianyun, Qian Feng, Wu Xian, et al. Fundamental study on CNC polishing method with inner channel liquid supply[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114(3): 1075-1085.