

基于欧拉-欧拉方法的细长管道内磨粒流加工数值模拟研究

刘 宵, 尹洪超, 穆 林*

(大连理工大学 能源与动力学院 辽宁省复杂能源转化和高效利用重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以 CFD 理论和仿真软件为基础, 建立了基于欧拉-欧拉方法的流体仿真计算模型, 开展了不同管型的细长圆管磨粒流抛光加工过程的模拟研究. 以 Preston 方程为评价依据, 分析了磨粒粒径、流体介质对抛光效果的影响规律, 得到了不同磨粒流参数下的圆管内壁抛光程度沿圆管轴向的变化趋势. 其次, 根据所建立的仿真计算模型得到了流体相和固体相对圆管内壁磨削效果的差异化特性, 分析了在流道局部突变位置流、固相产生较大差异的原因. 最后, 通过改变磨粒流入口温度, 得到了温度分布云图和不同温度下的抛光特性曲线, 为细长型流道工件的磨粒流加工提供了改进和优化方向.

关键词: 磨粒流加工; 欧拉-欧拉方法; 细长圆管; 数值模拟

中图分类号: TH161

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202102005

0 引言

固液两相流体的流动和相互作用在工业生产过程中非常普遍. 如石油、泥浆、雨水在管道中的输运过程, 流体中夹杂的固体颗粒会在管道中沉积、磨削壁面^[1]; 在传热传质领域, 在流体中加入固体颗粒, 会提高流体的对流换热系数, 使传热过程得到强化^[2]. 20 世纪 60 年代, 美国宇航局为去除航天用液压阀体等装置的内部毛刺, 提出一种利用两相流抛光零部件表面的加工工艺, 即磨粒流加工工艺 (abrasive flow machining, AFM)^[3].

近年来, AFM 工艺不断完善, 表现出抛光效率高、适应性强、对工件损伤低、表面压应力提高等优势, 并得到了广泛关注和应用^[3]. 国外研究方面, Williams 等^[4]以 AFM 的加工方式对密封板的铝-钢接触部位进行抛光加工, 极大提升了金属板密封、防泄漏的效果. Davies 等^[5]研究了不同黏度的流体与不同粒径的颗粒对 AFM 加工的影响. Petri 等^[6]考虑了影响磨粒流加工的诸多参数, 设计出适合各种流体和被加工材料的 AFM 预测系统. 国内研究方面, 周迪锋等^[7]以 CFD-DEM 耦合模型研究了磨粒撞击次数和撞击速度

对于抛光效果的影响. 李琛^[8]以可实现 $k-\epsilon$ 湍流模型和软性磨料的方法研究了磨粒流加工过程中速度、压力、湍流动能、湍流耗散率等诸多流体参数的分布特征. 高航等^[9]指出, 磨粒粒度特性以及不同黏度的流体流动特性对 AFM 加工过程具有显著影响, 仍需进行深入研究.

另一方面, 基于加工机理的仿真建模和数值分析过程可以分为流体流动和颗粒运动两个方面. 其中, 以流体流动为研究重点的主要目的是为了得到整个流场内的压力、速度、湍流强度等分布情况, 这是影响磨粒流加工特性的宏观因素, 可以对加工后的结果进行定性预测. 此类研究大多选择了基于拉格朗日方法的 Mixture 模型^[10]或 VOF 模型^[11], 适用于复杂曲面加工、磨粒表面的追踪以及湍流脉动的研究^[12]. 而以颗粒运动为研究重点, 则可以更好地得到局部磨削程度的规律, 以及颗粒对壁面磨削量的预测. 此类研究大多采用了 DPM (discrete phase model) 或 DEM (discrete element method), 分别适合模拟颗粒轨迹追踪和颗粒之间的相互作用规律. 本文的研究对象为某船用高压氧输送管道, 该管道是一种狭

收稿日期: 2020-05-18; 修回日期: 2020-12-15.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (DUT20LAB134).

作者简介: 刘 宵 (1996-), 男, 硕士生, E-mail: liuxiao960417@163.com; 穆 林* (1982-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, E-mail: l.mu@dlut.edu.cn.

长的异形管道,适合从流体的角度来研究 AFM 加工效果.相关领域的学者们大多采用欧拉-拉格朗日的方法进行研究^[13],先求解流体场,再将部分流体参数代入求解固体颗粒的运动,这样可能会导致固体颗粒的运动参数不准确,因此本文以欧拉-欧拉方法为原理构建仿真计算模型,该方法采用两套方程分别对流体和固体进行求解,并以相对速度、作用力等进行耦合,避免流、固参数的混淆.同时,考虑 AFM 加工过程中可能的传热及传质特性对加工过程的影响,重点研究颗粒粒径、磨料入口温度、磨料流体物性参数及流动特性等对壁面磨削特性的影响规律.

1 数学模型

数学计算模型以 CFD 理论为基础,包括两相流方程、湍流方程、能量方程.在固液两相流动的耦合计算方面,采用基于欧拉-欧拉原理的求解方法,将固体相(solid phase)视为流体,与液相(liquid phase)相互渗透,考虑固体颗粒相之间以及固液两相之间的相互作用.对固体、流体分别采用独立的方程进行求解,其连续方程和动量方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{v}_s) = (m_{ls} - m_{sl}) + S_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l) = (m_{sl} - m_{ls}) + S_l \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \mathbf{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{v}_s \mathbf{v}_s) = & -\alpha_s \nabla p + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_s + \\ & \alpha_s \rho_s \mathbf{g} + (\mathbf{R}_{ls} + \\ & m_{ls} \mathbf{v}_{ls} - m_{sl} \mathbf{v}_{sl}) + \\ & (\mathbf{F}_s + \mathbf{F}_{\text{lift}} + \mathbf{F}_{\text{vm},s}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l \mathbf{v}_l) = & -\alpha_l \nabla p + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_l + \\ & \alpha_l \rho_l \mathbf{g} + (\mathbf{R}_{sl} + m_{sl} \mathbf{v}_{sl} - \\ & m_{ls} \mathbf{v}_{ls}) + (\mathbf{F}_l + \mathbf{F}_{\text{lift}} + \\ & \mathbf{F}_{\text{vm},l}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: α 为体积分, ρ 为密度, t 为时间, \mathbf{v} 为速度, m 为传递的质量, S 为源项, p 为压力, $\boldsymbol{\tau}$ 为应力应变张量, \mathbf{g} 为重力加速度, \mathbf{F} 为外部体积力,下标 s, l 分别表示固相和液相,下标 sl 和 ls 分别表示从固相到液相和从液相到固相传递(或作用)关系, lift 表示上升, vm 表示虚质量.两相间的相

互作用力 \mathbf{R}_{sl} 和 \mathbf{R}_{ls} 分别见式(5)和(6):

$$\mathbf{R}_{sl} = K_{sl}(\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_l) \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_{ls} = K_{ls}(\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s) \quad (6)$$

式中: K_{sl} 和 K_{ls} 为两相之间的动量交换系数,与摩擦、黏滞等效应有关系.

式(3)和(4)中, \mathbf{F}_{lift} 为升力, \mathbf{F}_{vm} 为虚质量力,表示固相相对于液相相对运动时,固体颗粒受到的惯性作用,计算公式分别为

$$\mathbf{F}_{\text{lift}} = -0.5\alpha_s \rho_l (\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_s) \times (\nabla \times \mathbf{v}_l) \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_{\text{vm}} = 0.5\alpha_s \rho_l \left(\frac{d\mathbf{v}_l}{dt} - \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} \right) \quad (8)$$

液相和固相方程之间的平衡关系通过 \mathbf{R}_{sl} 、 \mathbf{R}_{ls} 、 \mathbf{F}_{lift} 、 \mathbf{F}_{vm} 耦合进行计算.

湍流方程采用基于雷诺平均的 Navier-Stokes 方程(RANS),湍流动能方程和耗散率方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon v_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \epsilon - \\ & \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: k 为湍流动能; v_i 为速度; μ 为流体的动力黏度; μ_t 为湍动黏度系数; G_k 为由速度梯度产生的湍流动能; ϵ 为湍流耗散率; σ_k 为湍流动能普朗特数,取 1; σ_ϵ 为湍流耗散普朗特数,取 1.3; C_1 、 C_2 为经验常数,分别取 1.44 和 1.92; ν 为流体运动黏度.由于本文研究的流体介质具有不同黏度特性,为了更精确求解湍流黏度,式(9)和式(10)中的 μ_t 不宜取为常数,而采用下式计算:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (11)$$

$$C_\mu = \frac{1}{4 + \sqrt{6} \cos \varphi \left(\frac{Uk}{\epsilon} \right)} \quad (12)$$

式中: $\varphi = \frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6} W)$, $W = \frac{E_{ij} E_{jk} E_{kj}}{\sqrt{E_{ij} E_{ij}}}$, $U = \sqrt{E_{ij} E_{ij} + \Psi_{ij} \Psi_{ij}}$, 均为中间变量,无具体含义.

$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, 表示时均应变率张量; $\Psi_{ij} = \Omega_{ij} - 2\epsilon_{ijk} \omega_k$, 表示以角速度 ω_k 为参考系的时均转动速率张量; $\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \epsilon_{ijk} \omega_k$, 表示转动速率张量.

固相和液相流动过程的能量传递按下式计算:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s h_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{v}_s h_s) = -\alpha_s \frac{\partial p}{\partial t} + \bar{\mathbf{c}}_s \cdot \nabla \mathbf{v}_s - \nabla \cdot \mathbf{q}_s + S_s + (Q_{ls} + m_{ls} h_{ls} - m_{sl} h_{sl}) \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l h_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l h_l) = -\alpha_l \frac{\partial p}{\partial t} + \bar{\mathbf{c}}_l \cdot \nabla \mathbf{v}_l - \nabla \cdot \mathbf{q}_l + S_l + (Q_{sl} + m_{sl} h_{sl} - m_{ls} h_{ls}) \quad (14)$$

式中： h 为比焓， u 为热力学能， q 为热通量， Q 为热交换量。

2 物理模型

2.1 几何模型

本文以某船用高压氧输送管道为研究对象，构建了直管、三通管和 U 形管 3 种管型结构的物理模型，其几何参数见图 1，管道外径和内径均取 $R=18\text{ mm}$ 和 $r=9\text{ mm}$ ， L 为从流道入口到出口的长度，取 $L=6\text{ m}$ 。管子材料为铜镍合金，物性参数见表 1。

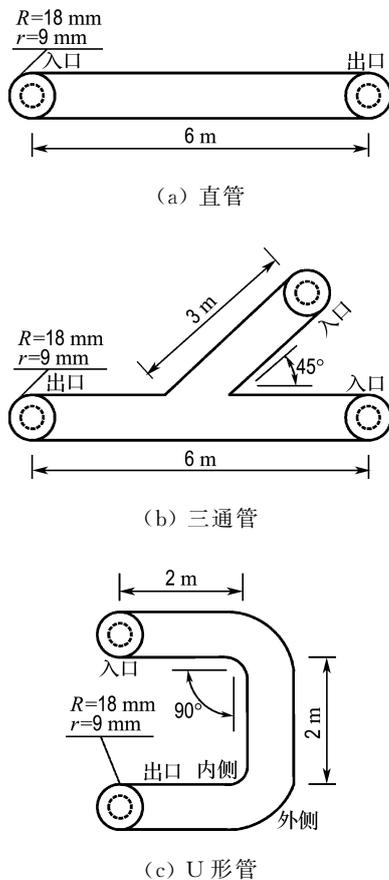


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical models

表 1 管子物性参数

Tab. 1 Physical parameters of tube

| 抗拉强度 σ_{b1}/MPa | 屈服强度 σ_{b2}/MPa | 布氏硬度 HB | 导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ |
|--|----------------------------------|-------------------|---|
| 480 | 195 | 135~179 | 45 |
| 密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 管内壁相对粗 糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 管内壁摩擦 因数 μ | |
| 8 900 | 50 | 0.5 | |

2.2 模拟设置

以 ANSYS18.2 系列软件为模拟工具，首先使用 ICEM-CFD 进行几何模型的建立和网格划分，区分流体计算域及固体计算域，由于模型尺寸较长，为提升计算速度，在长直段的网格划分稀疏，在接头部及弯部的网格划分较为密集。3 种管型的网格数量在 $220 \times 10^4 \sim 260 \times 10^4$ 。

选择 Fluent 软件为仿真计算工具，开启 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型、能量方程、多相流模型。根据流速、颗粒浓度的相关研究可知^[8,13]，速度会对 AFM 加工效果有较大影响，而颗粒浓度的影响较小。为实现较好的磨削效果同时避免颗粒沉积现象的出现，通常选取较高的入口速度以及较高的磨粒浓度^[14]。因此入口速度设置为 $30\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，液相设置为水，固相设置为 SiC 颗粒，体积分数为 10%，为研究不同颗粒粒径对 AFM 加工过程的影响，选取了 3 种颗粒直径 $d=10, 50, 100\ \mu\text{m}$ 分别进行模拟。磨粒流的初始温度分别设置为 293、323、363 K。出口边界条件为流动出口。内壁面的表面粗糙度取 $50\ \mu\text{m}$ ，摩擦因数 0.5；外壁面设置为对流换热表面，对流换热系数为 $20\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ，环境温度 T_0 为 293 K。

2.3 模型验证

为确保仿真计算结果合理，分别进行网格无关性验证和数值模型可靠性验证。对直管几何模型进行网格加密处理后，得到的压强分布与未加密时基本吻合，见图 2，表明本文划分的网格数量能够满足计算精度要求。此外，将李俊焯等^[15]对喷嘴小孔的磨粒流加工实验结果与本文方法所建立的喷嘴小孔模型仿真计算结果进行对比，见图 3。结果表明，计算得到的速度分布与实验结果之间的最大偏差为 9.8%，可以认为本文选择的模型是准确的。

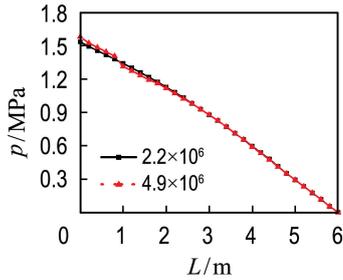


图 2 直管压力曲线

Fig. 2 Pressure curves of straight pipe

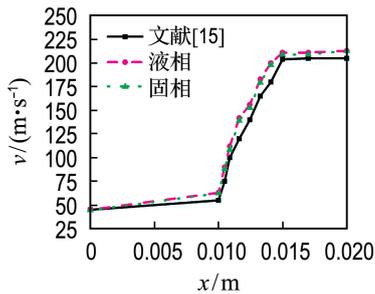


图 3 不同模型速度曲线的对比

Fig. 3 Comparisons of speed curves of different models

3 结果分析

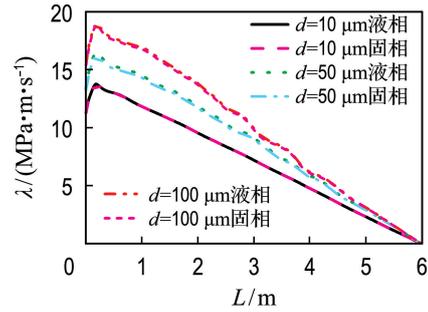
3.1 粒径对抛光过程的影响

Preston 方程^[16]是使用较为广泛的定量评价材料磨削加工的经验公式. 式中的压力、速度、时间 3 个主要变量也是磨粒流加工过程中的重要变量, 通过流体参数即可直接描述管壁的磨削效果. 其表达式为

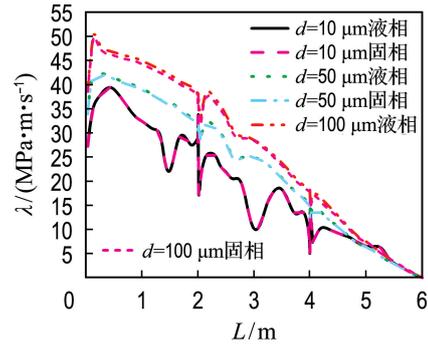
$$\Delta z = \int_0^t k_p v p dt \quad (15)$$

式中: Δz 为材料去除量, k_p 为 Preston 系数, 定义 $\lambda = vp$, 并通过 λ 的大小反映磨削程度的多少.

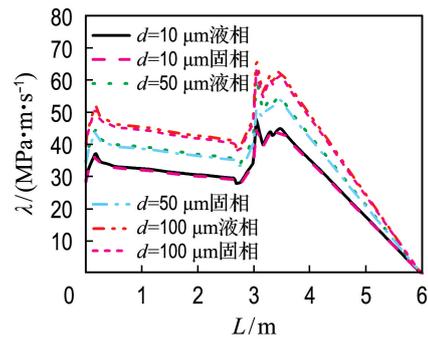
不同粒径的颗粒与壁面发生碰撞时, 会有不同的碰撞形态. 当颗粒粒径大于壁面的表面粗糙度时, 其碰撞形式为弹性碰撞; 颗粒的粒径小于壁面的表面粗糙度时, 颗粒可以进入相邻凸起之间的缝隙中, 除弹性碰撞外, 还会产生犁、削的效果^[17]. 除此之外, 大颗粒具有较大的动能, 单个颗粒与壁面碰撞时的磨削量更多, λ 更大. 因此, 大粒径的颗粒具有更好的磨削效果, 但是在磨削至一定程度后, 弹性碰撞的作用效果不再明显, 需更换小粒径的颗粒进行犁、削, 才会使壁面粗糙度进一步降低. 3 种管型 λ 分布见图 4. 粒径 $d = 10 \mu\text{m}$



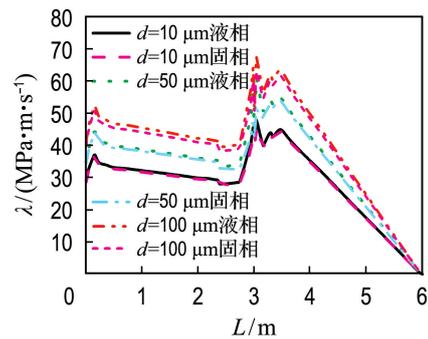
(a) 直管



(b) U形管



(c) 三通管水平支管



(d) 三通管 45°支管

图 4 不同管型 λ 曲线

Fig. 4 λ Curves of different tube types

时, U 形管的 λ 曲线波动较为明显, 这主要是由于 U 形管的几何模型特点, 流道分成内侧(曲率较小一侧)和外侧(曲率较大一侧), 见图 1(c). 流体

在转弯处的内、外侧会产生较大的速度、压力差，并会对接下来的流动过程产生扰动。此外，小粒径颗粒对壁面施加的弹性碰撞和犁、削综合作用，导致局部压力、速度波动较大，进而导致局部的 λ 波动较大。而直管与三通管中的流体均没有受到因流道转弯产生的内、外侧扰动，因此局部 λ 变化较为稳定。出口压力设置为 0，入口压力根据过程的降压进行耦合计算，因此总体上 λ 呈下降趋势，但在入口处，流体进入管内后，其流动会向充分发展段过渡，使得近壁区的速度增加，进而导致 λ 在入口位置先呈现出增加的趋势。

相关研究^[8,10]侧重于流体和固体颗粒对壁面的磨削综合作用效果，因此通常将流体的速度和压力假设为固体颗粒的速度和压力。本文采用欧拉-欧拉模型进行模拟，对流体和固体颗粒分别分析了 λ 的变化趋势。总体上看，流体与固体颗粒的差异并不明显。但是在 U 形管的局部，以及三通管的汇合处， λ 差异较为明显。这是因为相比于流体，固体颗粒具有更大的惯性，同时流体是连续的，固体颗粒是不连续的，因此固体颗粒运动状态

的变化具有一定的滞后性。在稳定的流段中，流体与固体颗粒可以保持相同的运动状态，但在不稳定的流段中，固体颗粒与流体在经历转向、碰撞等过程后，会产生相对的滑移速度，使得局部的运动状态产生明显的差异。此外，粒径的大小也会影响流体和固体颗粒对壁面的作用差异。粒径越小，其惯性越小，宏观运动的形式越接近流体，因此流体和固体颗粒的 λ 差异越小。根据 3 种管型管内流动的特性可以推测，在更复杂模型的 AFM 加工过程中，流体与磨粒的流动差异更加明显，不能以流体的运动参数代替固体的运动参数。

3.2 入口温度对抛光过程的影响

U 形管的流道既有长直部分，又有局部突变部分，而对温度分布的研究与管型关系不大，因此选择 U 形管为研究对象。为避免流体介质出现凝固、沸腾等相变现象，同时又要突出温度的差异性影响，液相流体水分别选取 3 个不同的初始温度 $T_w=293, 323, 363$ K，表 2 为 3 种温度下水的物理性质。

表 2 不同温度下水的物性参数

Tab. 2 Physical properties of water at different temperatures

| 初始温度/K | 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 比定压热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | 导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | 动力黏度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) | 表面张力/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$) |
|--------|--|---|---|--|---|
| 293 | 999.7 | 4 197 | 0.57 | 0.001 3 | 0.074 |
| 323 | 988.1 | 4 174 | 0.65 | 0.000 6 | 0.068 |
| 363 | 965.3 | 4 209 | 0.68 | 0.000 3 | 0.061 |

由图 5 可看出，温度 $T_w=293$ K 时的加工效果最好，这主要是两方面原因导致的。从液相来看，温度较低时，流体的密度较高，对管壁可以产生更大的挤压力；同时，该温度下流体表面张力较大，对于固体颗粒有更强的包裹性，在近壁区会对壁面产生更大的弹性力。从固体颗粒来看，金属材料以及 SiC 颗粒在低温时，密度也会增大，从而单个颗粒具有的动能更大；此外，低温时材料的韧性较低而脆性较大，SiC 颗粒碰撞壁面的粗糙部位时，产生的冲击力更易使粗糙部位被磨削掉。

AFM 加工过程中，流体、固体颗粒与管壁摩擦，会有大量热量产生。本文模拟加工时间 1 h，在外界环境温度 $T_0=293$ K 的情况下， T_w 与 T_0 的温差 ΔT 越小，则磨削过程中的热积聚量越多。

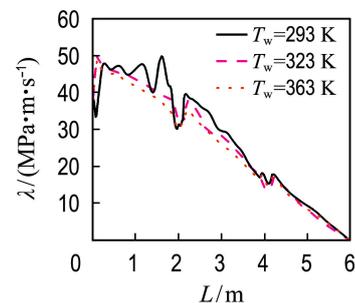


图 5 不同温度下的 λ 曲线

Fig. 5 λ Curves at different temperatures

在管子不同 L 处的温度分布基本均匀，只在进出口部位有所差异，因此选取了 $L=0$ 和 $L=3$ m 两个位置的截面进行分析。图 6 中， T 表示截面各处的温度。随着加工时间的延长，管壁温度会逐渐升

高,如前文所述,温度的升高会对加工产生不利影响.因此在加工过程中,对管壁适当进行冷却,或采取间断加工的方式,有利于实现更好的加工效果.

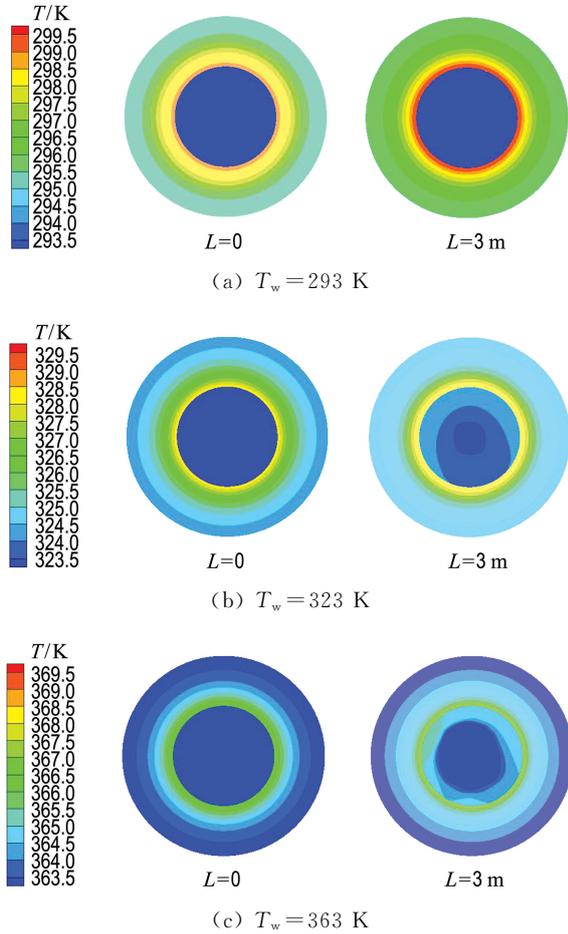


图 6 截面温度云图

Fig. 6 Cross-sectional temperature cloud maps

3.3 流体介质对抛光过程的影响

本节同样选取 U 形管为研究对象,对不同流体介质对抛光过程影响进行研究,见图 7,流体介质分别为水和酒精时, λ 具有一定的差异,为进一

步研究这种差异产生的原因,本文选择了流体的密度和动力黏度作为研究对象.静压和动压计算公式中都包含密度变量,因此密度变化会对压强分布造成影响.动力黏度表示流体中发生相对运动所需要的力的大小,从而会对流速、压力产生影响.为此,补充两种假想流体进行模拟.流体 A 的动力黏度与酒精相同,其他物理性质与水相同;流体 B 的密度与酒精相同,其他物理性质与水相同,4 种流体的主要物性参数见表 3.

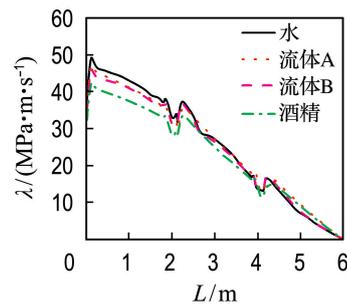


图 7 不同流体的 λ 曲线图
Fig. 7 λ Curves of different fluids

结果表明,流体的密度越大,对管壁的挤压程度就越大,从而壁面受到的压力越大.因此密度主要是通过影响压强大小进而影响 λ 的大小.流体的动力黏度反映了流体与管壁产生相对运动时的摩擦力大小.流体的动力黏度大,宏观表现为黏滞性高、流动所受的阻力大,损失的动能用于磨削壁面,即壁面受到了更大的切削力作用,因此当流体的动力黏度升高时,磨削效果会提升.综合密度与动力黏度影响因素,流体 A 的动力黏度虽然小于流体 B,但密度较比于流体 B 的更大,因为在本文模拟工况中密度起主导作用,流体 A 的 λ 更高.根据结果可以预测到,选择密度大、动力黏度高的流体作为介质进行 AFM 加工,可以获得较好的加工效果.

表 3 不同流体物性

Tab. 3 Physical properties of different fluids

| 名称 | 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | 比定压热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | 动力黏度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|------|--|---|---|--|
| 水 | 998 | 4 197 | 0.570 | 0.001 3 |
| 酒精 | 790 | 2 470 | 0.182 | 0.001 2 |
| 流体 A | 998 | 4 197 | 0.570 | 0.001 2 |
| 流体 B | 790 | 4 197 | 0.570 | 0.001 3 |

4 结 论

(1)磨粒粒径对 AFM 加工效果有显著影响. 磨粒粒径大于壁面表面粗糙度时,单位时间内的材料磨削量较大;磨粒粒径小于壁面表面粗糙度时,U形管道流动的局部 λ 波动较大.磨粒粒径增大使得流体相和固体相在流道的突变部位对管壁的作用差异明显增强.

(2)分析了入口温度对 AFM 加工的影响规律,得到了不同入口温度下的 AFM 加工过程热量积聚分布云图,结果表明降低加工温度、维持管壁恒温更有利于加工过程.

(3)研究了不同流体介质对 AFM 加工效果的影响.以流体的密度和动力黏度为变量,对水、酒精以及两种假想流体进行模拟,得到了以高密度、高动力黏度的流体作为磨粒流介质更有利于 AFM 的结论.

参考文献:

- [1] 沈雅欣,赵会军,彭浩平,等. 90° 竖直弯管的液固两相流冲刷腐蚀模拟 [J]. 腐蚀与防护, 2020, **41**(1): 50-57.
SHEN Yaxin, ZHAO Huijun, PENG Haoping, *et al.* Erosion corrosion simulation of liquid-solid two-phase flow in 90 degree vertical bend pipes [J]. **Corrosion and Protection**, 2020, **41**(1): 50-57. (in Chinese)
- [2] 李亦健. 深低温固液两相流管内流动及传热机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
LI Yijian. Investigation on mechanism of flow and heat transfer of cryogenic solid-liquid pipe flow [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [3] 高 航, 彭 灿, 王宣平. 航空增材制造复杂结构件表面光整加工技术研究及进展 [J]. 航空制造技术, 2019, **62**(9): 14-22.
GAO Hang, PENG Can, WANG Xuanping. Research progress on surface finishing technology of aeronautical complex structural parts manufactured by aviation additive manufacturing [J]. **Aeronautical Manufacturing Technology**, 2019, **62**(9): 14-22. (in Chinese)
- [4] WILLIAMS R E, WALCZYK D F, DANG H T. Using abrasive flow machining to seal and finish conformal channels in laminated tooling [J]. **Rapid Prototyping Journal**, 2007, **13**(2): 64-75.
- [5] DAVIES P J, FLETCHER A J. The assessment of the rheological characteristics of various polyborosiloxane / grit mixtures as utilized in the abrasive flow machining process [J]. **Journal of Mechanical Engineering Science**, 1995, **209** (6): 409-418.
- [6] PETRI K L, BILLO R E, BIDANDA B. A neural network process model for abrasive flow machining operations [J]. **Journal of Manufacturing Systems**, 1998, **17**(1): 52-64.
- [7] 周迪锋, 刘冬玉. 耦合 DEM-CFD 法双入口磨粒流动力学模拟及加工试验 [J]. 机电工程, 2013, **30**(12): 1467-1471.
ZHOU Difeng, LIU Dongyu. Coupling DEM-CFD double inlet abrasive flow dynamics of numerical simulation and test device [J]. **Journal of Mechanical and Electrical Engineering**, 2013, **30**(12): 1467-1471. (in Chinese)
- [8] 李 琛. 软性磨粒流近壁区域微切削机理及其控制方法研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
LI Chen. Research on micro-cutting mechanism and control method of soft abrasive flow near the wall area [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] 高 航, 吴鸣宇, 付有志, 等. 流体磨料光整加工理论与技术的发展 [J]. 机械工程学报, 2015, **51**(7): 174-187.
GAO Hang, WU Mingyu, FU Youzhi, *et al.* Development of theory and technology in fluid abrasive finishing technology [J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2015, **51**(7): 174-187. (in Chinese)
- [10] 李俊焯, 周立宾, 张心明, 等. 整体叶轮磨粒流抛光数值模拟研究 [J]. 制造业自动化, 2016, **38**(12): 88-93.
LI Junye, ZHOU Libin, ZHANG Xinming, *et al.* The numerical simulation research on abrasive flow polishing integral impeller [J]. **Manufacturing Automation**, 2016, **38**(12): 88-93. (in Chinese)
- [11] 计时鸣, 唐 波, 谭大鹏. 基于 VOF 的模具结构化表面软性磨粒流数值模拟 [J]. 中国机械工程, 2011, **22**(3): 334-339.
JI Shiming, TANG Bo, TAN Dapeng. Softness abrasive flow numerical simulation for VOF based structural surfaces of mould [J]. **China Mechanical Engineering**, 2011, **22**(3): 334-339. (in Chinese)
- [12] 张 利, 陈俊超, 陈国达, 等. 基于湍流分散的磨粒流场分析及加工实验研究 [J]. 机电工程, 2018, **35**(12): 1266-1272.
ZHANG Li, CHEN Junchao, CHEN Guoda, *et al.*

- Turbulent dispersion based flow field analysis and experiment of abrasive flow machining [J]. **Journal of Mechanical and Electrical Engineering**, 2018, **35**(12): 1266-1272. (in Chinese)
- [13] PETARE A C, JAIN N K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process [J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2018, **97**(1): 741-782.
- [14] 李俊焯, 乔泽民, 杨兆军, 等. 介观尺度下磨料浓度对磨粒流加工质量的影响 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, **47**(3): 837-843.
- LI Junye, QIAO Zemin, YANG Zhaojun, *et al.* Influence of abrasive concentration on processing quality of abrasive flow in mesoscopic scale [J]. **Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)**, 2017, **47**(3): 837-843. (in Chinese)
- [15] 李俊焯, 卢慧, 苏宁宁, 等. 基于 Smagorinsky 模型的磨粒流加工喷嘴小孔的大涡模拟 [J/OL]. 中国机械工程: 1-8. [2020-03-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20190620.1529.014.html>.
- LI Junye, LU Hui, SU Ningning, *et al.* Abrasive flow machining nozzle holes by Smagorinsky model of large eddy simulation [J/OL]. **China Mechanical Engineering**: 1-8. [2020-03-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20190620.1529.014.html>. (in Chinese)
- [16] 韩晓露, 王家忠, 弋景刚, 等. 基于 Preston 方程的反射杯抛磨工艺参数研究 [J]. 机床与液压, 2018, **46**(14): 12-16.
- HAN Xiaolu, WANG Jiazhong, YI Jinggang, *et al.* Study on polishing processing parameters of reflective cup based on Preston equation [J]. **Machine Tool and Hydraulics**, 2018, **46**(14): 12-16. (in Chinese)
- [17] 计时鸣, 王嘉琦, 谭大鹏. 基于 ABAQUS 的单个颗粒与加工面碰撞对固液两相流加工的影响研究 [J]. 机电工程, 2013, **30**(1): 1-4, 14.
- JI Shiming, WANG Jiaqi, TAN Dapeng. Influence of colliding of single particle and the processing wall on solid-liquid flow processing with ABAQUS [J]. **Journal of Mechanical and Electrical Engineering**, 2013, **30**(1): 1-4, 14. (in Chinese)

Numerical simulation research of abrasive flow machining in slender pipe based on Euler-Euler method

LIU Xiao, YIN Hongchao, MU Lin*

(Key Laboratory of Complex Energy Conversion and Utilization, Liaoning Province, School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: According to CFD theory and simulation software, a fluid simulation calculation model was established on the basis of Euler-Euler method, and the abrasive flow polishing process of slender round tubes with different types was studied numerically. Taking the Preston equation as evaluation basis, the influences of abrasive particles sizes, and fluid medium on the polishing effect were analyzed, and the change trends of the polishing effect of the inner wall of the tube along the axial direction of the tube under different abrasive flow parameters were obtained. Furthermore, according to the established simulation calculation model, the differential characteristics of the polishing effect of the fluid phase and the solid phase to the inner wall of the tubes were obtained, and the reasons for the difference between the fluid phase and the solid phase at the local position of the flow channel were analyzed. In addition, by changing the temperature of the inlet of abrasive flow, the temperature distribution cloud map and the polishing characteristic curves at different temperatures were obtained, which provides an improvement and optimization direction for the abrasive flow machining of the slender flow channel components.

Key words: abrasive flow machining; Euler-Euler method; slender round tube; numerical simulation