

基于自激振荡脉冲特性的磨粒流抛光 不锈钢细管内壁的仿真与实验研究

邓乾发^{1a,1b}, 郭晨曦^{1a,1b}, 袁巨龙^{1a,1b}, 周辉^{1a,1b},
吕冰海^{1a,1b}, Duc-Nam Nguyen²

(1.浙江工业大学 a.超精密加工研究中心 b.特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室,
杭州 310023; 2.胡志明市工业大学, 越南 胡志明市 700000)

摘要: **目的** 解决传统抛光方法对细管件或微孔内表面抛光困难的问题。**方法** 提出一种基于自激振荡脉冲特性的磨粒流抛光方法。利用自激振荡腔,使磨粒流产生振荡脉冲,实现对细管件或微孔内壁高效抛光。建立自激振荡脉冲磨粒流流体区域的数学模型,并通过数值仿真计算获得自激振荡腔体的结构参数 d_2/d_1 和 L/D 以及过渡角 β 。搭建实验平台,实验验证了自激振荡脉冲特性磨粒流抛光方法的有效性。**结果** 不锈钢细管件的抛光结果表明,加工 12 h 后,不锈钢细管件内壁的粗糙度 Ra 从 480 nm 降到 50 nm,内壁面轮廓无明显的单向性纹理;14 h 后,不锈钢细管内壁有明显镜面效果。而无振荡腔的情况下需要磨粒流抛光 14 h,管件内壁表面粗糙度才达到 55 nm,壁面轮廓存在明显的磨粒流抛光流动方向的纹路。**结论** 通过仿真和实验证明了自激振荡脉冲效应抛光方法(SOAFP)的有效性。此外,在本实验条件下,自激振荡腔体的结构参数 $d_2/d_1=1.6$ 、 $L/D=0.5$ 和过渡角 $\beta=60^\circ$ 时,抛光效率和抛光后表面质量最佳。

关键词: 细管; 内表面; 自激振荡脉冲特性; 磨粒流; 抛光; 不锈钢细管内壁

中图分类号: TG580.692 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)10-0363-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.045

Simulation and Experimental Study on Polishing Inner Surface of Tubule by Self-excited Oscillation Abrasive Flow

DENG Qian-fa^{1a,1b}, GUO Chen-xi^{1a,1b}, YUAN Ju-long^{1a,1b}, ZHOU hui^{1a,1b},
LYU Bing-hai^{1a,1b}, Duc-Nam Nguyen²

(1.a.Ultra-precision Machining Center, b.Key Laboratory of Special Equipment Manufacturing and Advanced Processing
Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;
2.Hochiminh University of Industry, HoChi Minh City 700000, Vietnam)

ABSTRACT: The work aims to polishing the inner surface of tubule or microholes which is hard to do by traditional polishing method. A novel abrasive flow polishing method (SOAFP) based on self-oscillation pulse characteristics was proposed.

收稿日期: 2019-02-04; 修订日期: 2019-08-01

Received: 2019-02-04; Revised: 2019-08-01

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51775511); 浙江省自然科学基金一般资助项目(LY17E050022)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775511) and Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY17E050022)

作者简介: 邓乾发(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为超精密表面加工技术。

Biography: DENG Qian-fa (1972—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: ultra-precision surface machining.

通讯作者: 袁巨龙(1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为超精密表面加工技术。邮箱: jlyuan@zjut.edu.cn

Corresponding author: YUAN Ju-long (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: ultra-precision surface machining. E-mail: jlyuan@zjut.edu.cn

Self-excited oscillation cavity was used to produce the pulsation of abrasive flow, which can efficiently polish the inner surface of the tubule or microhole. The mathematical model was established and the numerical simulation was carried out, the structural parameters d_2/d_1 , L/D and transition angle β were obtained. The experimental platform was built and the effectiveness of SOAFP was verified by experiments. The result shows that the roughness of the inner surface of stainless steel tubule Ra was reduced from 480 nm to 50 nm after 12 hours of processing of SOAFP, with no obvious directional texture, and 14 hours later, the inner surface of stainless steel tubule had obvious mirror effect. In the case of non-oscillation cavity, the surface roughness of the inner wall of the tubule was 55 nm after 14 hours of polishing, and there was obvious directional texture on the inner surface. The simulation and experiments show the effectiveness of self-excited oscillation pulse effect polishing method (SOAFP), and the improvement of polishing effect and quality by the structure parameters of the structural parameters d_2/d_1 , L/D and transition angle β .

KEY WORDS: tubule; inner surface; self-oscillation pulse characteristics; abrasive flow; polishing; stainless steel tube inner wall

管件结构广泛存在于模具、工程机械、航空航天等各个领域，管件内壁的表面质量对零件的性能、使用寿命以及可靠性都有巨大影响。但是，工件孔道或者管件内表面（如图 1、2）的抛光一直以来都非常困难^[1-4]。因此，国内外的专家学者研究出磁流变抛光、磨粒流抛光、电化学抛光、超声振动抛光等抛光方法，用以管件内壁的抛光，但都有一定的局限性（表 1）。磁流变抛光需借助工具头对腔体内表面进行仿形加工，其加工过程受工具尺寸的限制，且对于具有沟、槽、孔等结构的内腔的抛光，难以达到好的

效果^[5-6]；电化学抛光只能用于导电材料的抛光，且抛光效果难以保证，还有污染环境等问题存在^[7-8]；传统磨粒流抛光虽然也适用于管件的内壁抛光，但是当加工薄壁零件时，高压可能会导致薄壁工件发生变形^[9-11]。因此，研发出适于管件的抛光技术是亟待解决的问题。

自激振荡脉冲特性是一种不需要外加动力条件，只依靠流体本身在一定的流体结构以及特殊边界条件限制下产生的脉冲特性，它能将连续性流动转变为涡环脉冲特性流动。当具有一定速度的流体流入自激



图 1 点胶针
Fig.1 Dispensing needle



图 2 不锈钢毛细管
Fig.2 Stainless steel capillary

表 1 管件内表面主要抛光方法性能对比
Tab.1 Comparison of polishing methods on the inner surface of pipe fittings

Polishing method	Advantage	Disadvantage
Magnetorheological polishing	Strong controllability, good adaptability, suitable for various surfaces, environment friendly	High cost, short life and low processing efficiency
Electrochemical polishing	Simple processing, low cost, suitable for various surfaces, and the surface hardness after polishing is improved	Only suitable for conductive materials, and the electrolyte pollutes the environment, the sharp edges is difficult to polishing well
Ultrasonic vibration polishing	No deformation and burns, low residual stress, suitable for processing various shapes and materials, polishing thin walls, thin sheets, narrow slits and low stiffness parts	Due to the size of the tool, it is difficult to polish complex internal surfaces such as slits
Abrasive flow polishing	Do not produce metamorphic layer and residual stress, and the processing quality is relatively stable and the processing range is wide	Abrasive will remain in the grooves and corners, and high pressure may cause deformation of thin-walled parts

振荡腔时,腔内流体与射流之间发生动量交换,形成不稳定剪切层,由于剪切层与射流的相互作用产生涡环,当有初始振荡的射流与不断生成的涡环同时到达碰撞壁时,则会产生一定频率的压力扰动波。扰动波的频率与射流初始振荡的频率相接近时,整个流体的振荡被迭加、放大,从而形成具有一定周期的速度波动的脉冲射流^[12-15]。

磨粒流抛光是一种利用磨粒流流经待加工结构表面,使磨粒作用于待加工表面,并去除表面微凸结构,达到抛光效果的加工方式^[9]。本文将自激振荡的流体特性和低黏度的磨粒流抛光方法结合起来,提出了自激振荡脉冲特性磨粒流抛光技术(SOAFP),介绍了SOAFP的原理,建立了自激振荡脉冲磨粒流流体区域的数学模型,并对自激振荡脉冲特性磨粒流进行数值仿真,通过仿真模拟对自激振荡腔体的结构参数以及加工流道部分的结构进行优化;搭建了实验平台,通过实验验证自激振荡脉冲特性磨粒流抛光方法的有效性,并研究优化后自激振荡腔结构和加工流道结构对加工效率和加工质量的影响。

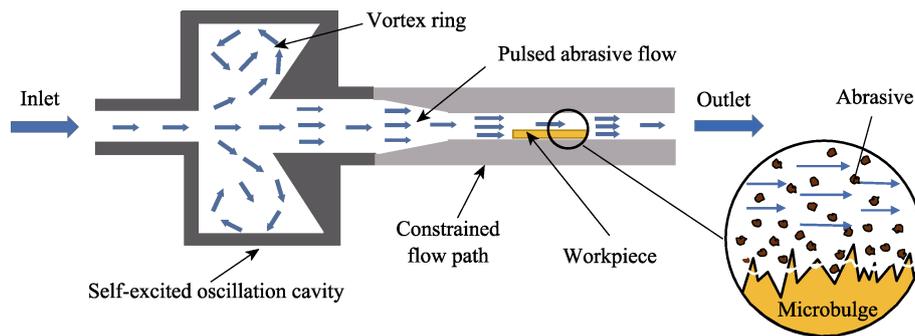


图 3 自激振荡脉冲磨粒流抛光原理

Fig.3 Principle of self-excited oscillation abrasive flow polishing

由于约束流道中的脉冲磨粒流流速呈周期性波动,其峰值速度和压力都较常规层流状态磨粒流更大。在微峰上的磨粒峰值动能更大意味着工件表面的材料去除率也更大。在SOAFP中,磨粒的材料去除主要来自于磨粒高速运动的冲击载荷,因此自激振荡磨粒流能够增加磨粒流湍流动能,消除表面纹理的方向性,提高加工效率,实现待加工表面纹理的无序化,并获得更小的表面粗糙度和更好的表面质量,易于实现镜面加工。

2 流场建模与数值模拟

2.1 磨粒流仿真的数学模型

假设约束流道内磨粒流中的固相磨粒均匀分布在液相中,两相流模型主要由磨粒的体积分数决定,而且磨粒直径足够小,两相间就没有相对滑移速度。因此本文选择Mixture混合多相流模型作为模拟的基本数值模型,其连续方程如式(1)所示:

1 自激振荡脉冲磨粒流抛光原理

本文提出的自激振荡脉冲磨粒流抛光方法是基于固液两相磨粒流抛光方法和流体的自激振荡脉冲特性提出的。其原理是使固液两相磨粒流在经过自激振荡脉冲发生器后,产生脉冲磨粒流,脉冲磨粒流在经过相应的流道的过程中作用于工件待加工表面(管件内壁),并通过磨粒流中硬质磨粒无规则运动及其对待加工表面微峰的微量切削作用来完成抛光过程。

SOAFP中磨料去除作用主要是通过壁面层的脉冲磨粒流中的磨粒高速运动的冲击载荷,去除壁面层微凸,实现对壁面层的材料去除,其原理如图3所示。脉冲磨粒流抛光过程中,工件内表面存在许多微小凸起,流体介质携带着磨粒高速运动,在近壁区域运动的微小磨粒必然会和工件表面的微小凸起发生碰撞,当磨粒的冲击载荷达到一定的强度,一些微凸就会被去除,近壁区域的磨粒的动能大小直接决定了壁面材料的去除率。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m v_m) = 0 \quad (1)$$

式中, $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$ 为混合磨粒流密度 (kg/m^3);

$v_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_k}{\rho_m}$ 为平均速度 (m/s); n 为多相流相数;

α_k 、 ρ_k 和 v_k 分别为第 k 相的体积分数、密度和速度。

Mixture 模型动量方程如式(2)所示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m v_m) + \nabla \cdot (\rho_m v_m v_m) = \\ - \nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla v_m + \nabla v_m^T)] + \\ \rho_m g + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_{dr,k} v_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$ 为混合黏度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$); F 为体积力 (N); $v_{dr,k} = v_k - v_m$ 是第 k 项的滑移速度 (m/s)。

$v_{dr,k}$ 的解可由第二相体积分数方程 (式 3) 求出:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k v_m) = \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k v_{dr,k}) k = 2 \quad (3)$$

处于湍流状态的磨粒在随机方向运动, 这样能消除表面纹理的方向性, 有更好的抛光效率和抛光效果。SOAFP 中的脉冲磨粒流也处于湍流状态, 故本文选用可实现 $K-\varepsilon$ 湍流模型, 来描述约束通道内的磨粒流^[16-17]。因为可实现 $K-\varepsilon$ 模型对于射流、管道内混合流的自由流动的模拟都有很好的效果。其中, 湍动能 K 和耗散率 ε 由公式 (4—6) 得到:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$\rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} \quad (5)$$

$$K = \frac{3}{2} (U \cdot I)^2 \quad (6)$$

式中, ρ 为流体密度 (kg/m^3); t 为时间 (s); x_i 、 x_j 为对应各坐标分量; u_i 为速度矢量在三个坐标轴方向的分量 (m/s); G_k 为由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; μ 为流体动力黏度 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$); ν 为流体的运动黏度 (m^2/s); μ_t 为湍流黏性系数; E 为应变率 (s^{-1}); σ_k 和 σ_ε 为湍动能 k 和耗散率 ε 的湍流普朗特数, σ_k 取 1.0, σ_ε 取 1.2; C_1 为模型系数; $C_2 = 1.9$; U 是平均速度 (m/s); I 是湍流强度 (%)。

2.2 磨粒流的数值仿真

2.2.1 前处理

本文采用二维建模对自激振荡腔体以及约束流道的流体区域进行建模仿真, 流体区域建模如图 4 所示。流体区域的网格划分由 mesh 模块完成, 仿真区

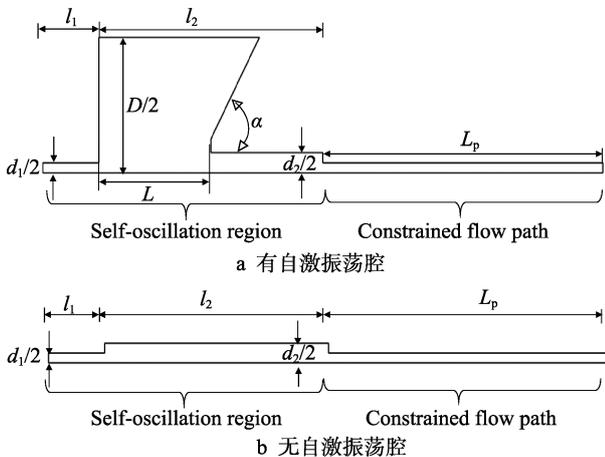


图 4 有自激振荡腔的流体区域
Fig.4 Fluid area with self-excited oscillation chamber
(a) and no oscillation chamber (b)

域的网格划分示意图如图 5 所示。考虑到计算精度的问题, 网格在抛光流道内壁面附近进行了适当加密。考虑到磨料颗粒对壁面的影响, 自激振荡腔体上游进口处圆形通道直径 d_1 为 6 mm, 下游出口直径 d_2 为 11 mm, 自激振荡腔直径 D 为 80 mm, 碰撞壁截面夹角 α 为 60° , 腔长 L 为 40 mm, l_1 和 l_2 分别为 20 mm 和 80 mm, 约束流道的直径为 6 mm, 加工流道长度 L_p 为 100 mm。

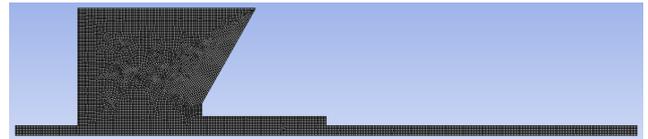


图 5 流体区域网格划分
Fig.5 Meshing of fluid area

SOAFP 中磨粒流的湍流模型采用可实现 $K-\varepsilon$ 模型, 并通过压力耦合方程的 SIMPLE 算法求解, 其他项用二阶迎风格式进行离散, 脉冲磨粒流仿真参数如表 2 所示。左侧入口边界条件为 “velocity-inlet”。壁面设置为无滑移壁面条件。计算步长取 0.01 s, 时间步取 1000 步。

表 2 磨粒流仿真参数表
Tab.2 Simulation parameters of SOAFP

Simulation parameters	values
Abrasive density of the slurry/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	115.4
Abrasive density of SiC/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	3170
Kinetic viscosity of the slurry/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.55×10^{-3}
Kinetic viscosity of SiC/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.32×10^{-5}
Grain size/ μm	23
Volume fraction of abrasive/%	0.1
Inlet velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	60
Inlet pressure/MPa	1
Outlet pressure/MPa	0

2.2.2 流道内压力与速度波动的仿真

SOAFP 中材料的去除主要来自于磨粒无序的高速运动对流道内表面微凸的碰撞, 因此脉冲磨粒流流速和湍流强度都是决定 SOAFP 的加工效率的主要因素。设距入口处 20 mm 为监测点, 在监测点处有振荡腔和无振荡腔的流体速度仿真结果, 如图 6 所示。在监测点处, 有振荡腔体情况下流速波动明显, 并以一定周期波动, 速度峰值能够达到 76.7 m/s; 而无自激振荡腔体情况下的流速无明显波动, 流速保持在 73 m/s 左右。自激振荡腔的存在带来的流速脉冲波动, 能够促使磨粒对管件内壁施加更大的峰值载荷, 加剧材料表面的去除作用, 提高加工效率。

在流道上取 10 个等距的监测点, 在流动方向上监测点的峰值速度及拟合曲线如图 7 所示。对于

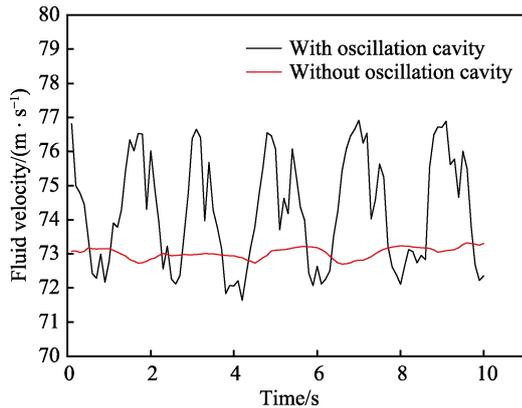


图 6 通道入口监测点处的流体速度
Fig.6 Velocity at the monitoring point at the inlet

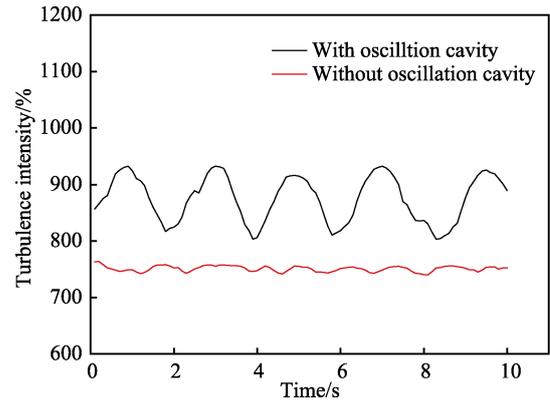


图 8 通道入口处的监测点处的湍流强度
Fig.8 Turbulence intensity at the monitoring point at the inlet

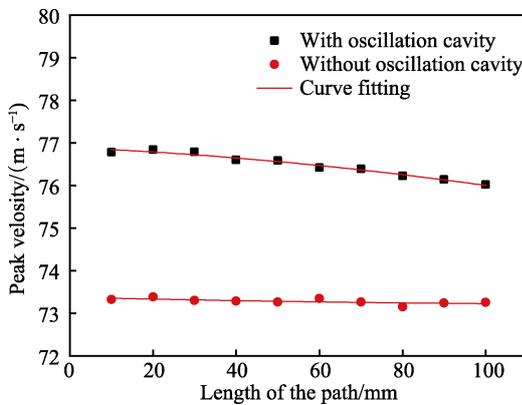


图 7 流动方向上不同位置的峰值速度
Fig.7 Peak velocity at different locations in the flow direction

道内流体流速剧烈波动，加剧了通道内的湍流强度。

在通道上取 10 个等距监测点，在流动方向上监测点的峰值湍流强度及拟合曲线如图 9 所示，该拟合曲线反映了湍流强度随着通道长度的增加而剧烈下降并逐渐平稳的变化趋势。虽然振荡腔产生的脉冲效应对湍流强度有显著增益，但由于壁面摩擦阻力的影响，有无振荡腔的湍流强度逐渐趋近，到 100 mm 处，湍流强度差距已经不大。因此，为保证 SOAFP 的有效性，加工管件的长度应加以控制。

100 mm 的通道，有自激振荡腔体的通道内磨粒流的峰值流速整体都比无自激振荡腔体的通道内高 3 m/s 以上，理论上体现了 SOAFP 抛光方法有效性。而由拟合曲线可知，有自激振荡腔体的磨粒流的峰值流速在缓慢下降，在 100 mm 长的通道内，峰值流速衰减了 0.8 m/s 左右。这种现象是通道内壁与二相磨粒流的动量传递作用的结果，管道流动的摩擦阻力使振荡腔体产生的周期性波动不断衰减。因此，SOAFP 加工管件时，需考虑衰减长度对于抛光效果的影响。

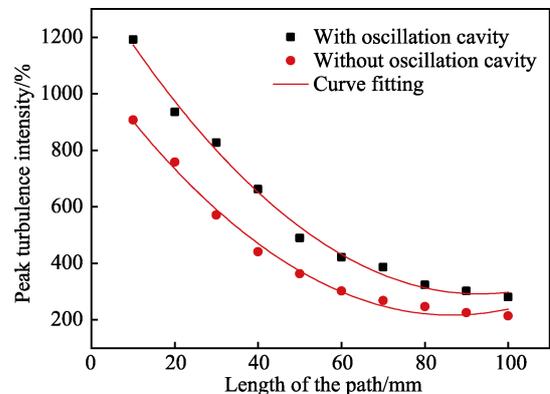


图 9 流动方向上不同位置的湍流强度
Fig.9 Peak turbulence intensity at different locations in the flow direction

2.2.3 通道内湍流强度的仿真

抛光通道中脉冲磨粒流的湍流强度体现了磨粒在通道中无序运动的剧烈程度，对 SOAFP 加工效果有至关重要的作用。取距入口处 20 mm 为监测点，对于有无自激振荡腔体情况下通道监测点处的湍流强度进行了仿真，取加工过程中 10 s 的湍流强度变化结果，如图 8 所示。随着时间的变化，有振荡腔体的通道内湍流强度发生周期性波动，湍流强度在 800%~950% 内波动；而在无振荡腔的通道内，湍流强度的变化不大，稳定在 770% 左右。在该位置上，有振荡腔流体的湍流强度比无振荡腔流体的湍流强度要大 100% 左右，这主要是由于自激振荡腔产生的脉冲效应使流

2.2.4 振荡腔体的优化

脉动效应由自激振荡腔的固有频率决定，而其固有频率由自激振荡腔的结构参数决定。本文先对振荡腔结构进行优化，当流速恒定时，固有频率的方程和结构参数如式 (7) 所示：

$$f_{\tau} \propto \sqrt{D_m} \cdot \frac{\sqrt{1+1.63(d_2/d_1)^2}}{D\sqrt{L}} \quad (7)$$

式中， D 为腔径， L 为腔长， d_1 为入口喷嘴直径， d_2 为出口喷嘴直径， D_m 是振荡腔内混合流体的边界膨胀模量， f_{τ} 为固有频率^[18-19]。

由式(7)中可知, d_2/d_1 与 L/D 比值都是影响脉动效应的重要因素。因此, 腔体结构主要是对 d_2/d_1 与 L/D 的比值进行优化。根据现有研究, 当 d_2/d_1 在 1.2~2 范围内, 并且 L/D 范围在 0.4~0.8 时, 振荡效果比较显著^[20-21]。文中, $d_1=6\text{ mm}$ 、 $D=80\text{ mm}$ 、 $\alpha=120^\circ$ 是固定的, d_2 和 L 是变化的。为研究在不同 d_2/d_1 与 L/D 比值下, 流道中监测点处的速度波动情况, 本文引入速度的标准差系数来反映其离散程度, 结果如图 10 和图 11 所示。

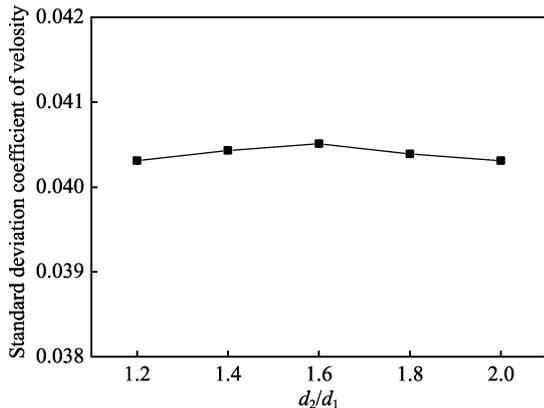


图 10 不同 d_2/d_1 时速度标准差系数
Fig.10 Velocity standard deviation coefficient at different d_2/d_1

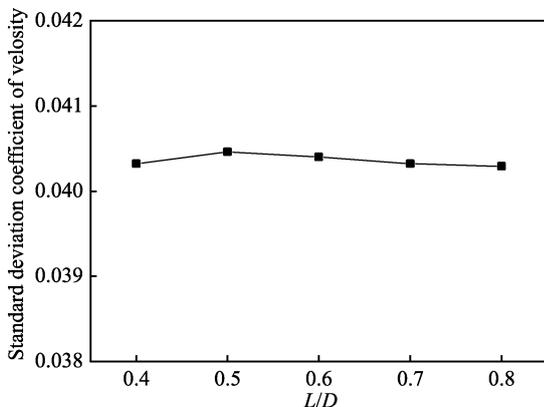


图 11 不同 L/D 时速度标准差系数
Fig.11 Velocity standard deviation coefficient at different L/D

离散程度越高, 说明其波动幅度约大, 产生更大的峰值载荷和更剧烈的湍流强度, 能提高加工的效率。从图 10 中看出, 随着下喷嘴口径和上喷嘴口径比值的增加, 磨粒流的标准差系数在 1.6 时达到最大, 此时磨粒流的离散性能较优越。而图 11 中展示了当 L/D 为 0.5 时, 标准差系数达到最大值, 此时离散性能更好。

2.2.5 抛光流道的优化

在自激振荡腔下, 喷嘴到流道入口附近存在湍流集中的现象, 该处湍流强度高达 1250%。高强度的湍流集中会导致管件内壁材料去除的不均匀, 不利于加

工的一致性, 并容易产生“喇叭口”现象。因此, 本文通过改变自激振荡出口的角度来获得更好的加工均匀性。

如图 12 所示, 为降低高强度湍流集中可能造成的管件内壁抛光不均匀现象, 在自激振荡腔体到抛光流道之间加入一个过渡角 β 来避免管径突然减小所产生的湍流急剧增大现象。针对不同的过渡角 β 情况下流道内壁面的湍流强度变化进行分析, 如图 13 所示。

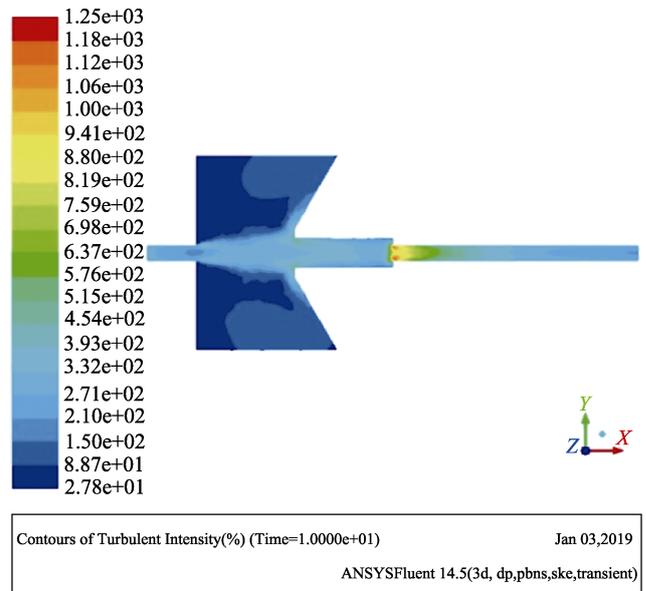


图 12 流体区域的湍流强度分布图
Fig.12 Turbulence intensity distribution in the fluid region

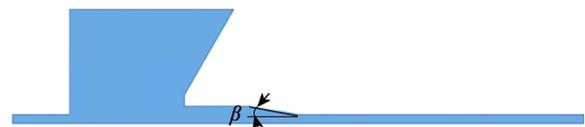


图 13 优化后流体区域
Fig.13 Optimized fluid area

由于过渡角过大时存在湍流效应集中现象, 本文对 20° 、 40° 、 60° 、 80° 过渡角情况下流道内 10 个监测点处的峰值速度进行仿真分析, 结果见图 14。由

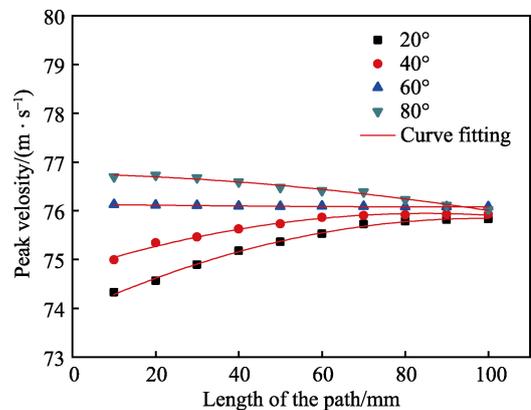


图 14 不同过渡角下各监测点的峰值速度
Fig.14 Peak velocity of monitoring points at different transition angles

其拟合曲线看出，当过渡角在 20°、40°时，峰值速度是随着流道长度递增的；而当过渡角在 80°时，峰值速度随着流道长度递减；当过渡角在 60°时，管道内各监测点的峰值速度基本保持不变，这样能有效保证管道内壁在流动方向上的抛光具有良好的一致性。

3 实验和讨论

3.1 自激振荡脉冲特性磨粒流加工试验平台

根据仿真分析结果，设计并搭建了加工试验平台，如图 15 所示。试验平台主要包括：磨粒流混料桶、供料泵、自激振荡发生器、工件、磨粒流约束抛光装置。磨料桶中的抛光液通过泵压作用流经自激振荡发生器，经振荡后，振荡磨粒流经过管件内壁流道，作用于工件，并重新流入磨料桶中。通过循环利用抛光液来实现管件的抛光。

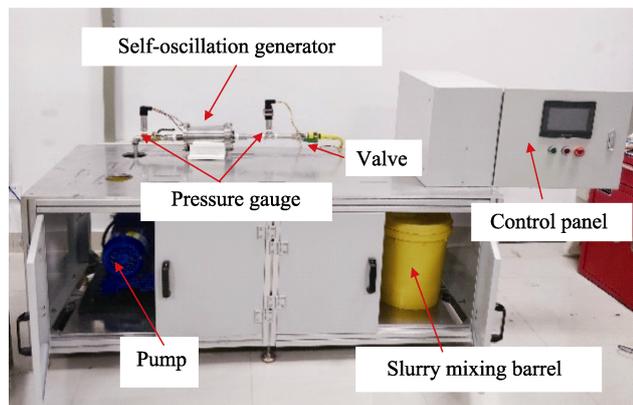
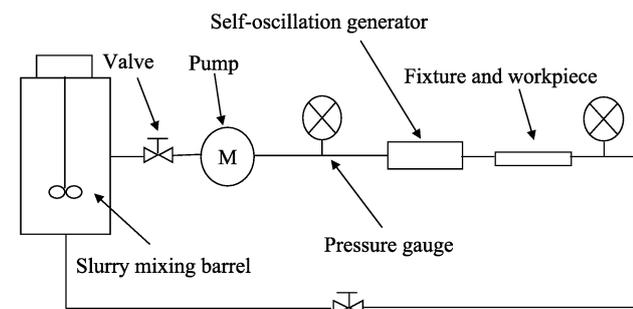


图 15 SOAFP 实验平台系统图以及实物图
Fig.15 SOAFP experimental platform system diagram and physical map

3.2 自激振荡磨粒流加工实验

加工件为 SUS304 不锈钢管，内径为 6 mm，长度为 100 mm。选用粒径 600#的碳化硅作为磨粒，磨料质量分数为 10%，泵的流量为 6 m³/h，自激振荡发生器结构参数与图 4 一致，其结构如图 16 所示。为

便于检测，实验使用剖开的不锈钢管附以夹具进行，以 2 h 为一组，分别在有无自激振荡腔体情况下对不锈钢细管内壁进行抛光，同一监测位置的粗糙度变化情况如图 17 所示。由图可知，有振荡腔的情况下大概加工 12 h，内壁的粗糙度 R_a 从 480 nm 降到 50 nm 左右，而无振荡腔的情况下需要加工 14 h 才能到 55 nm，自激振荡腔体的加入明显使加工时间缩短了 2 h 左右。

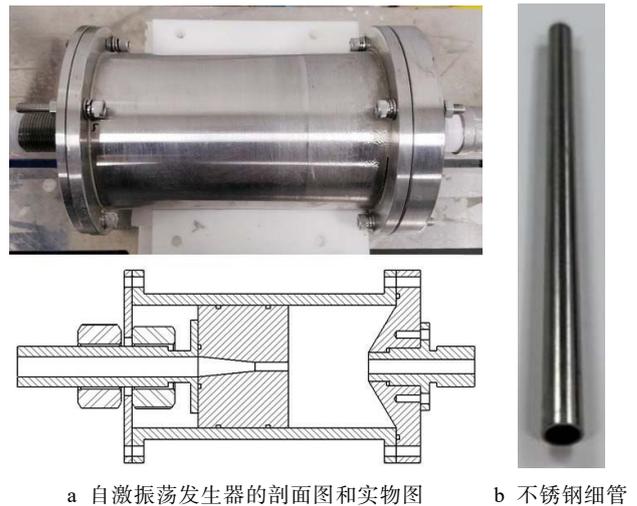


图 16 自激振荡发生器结构图

Fig.16 (a) Cross-sectional view and physical map of the self-excited oscillation generator, (b) stainless steel tube

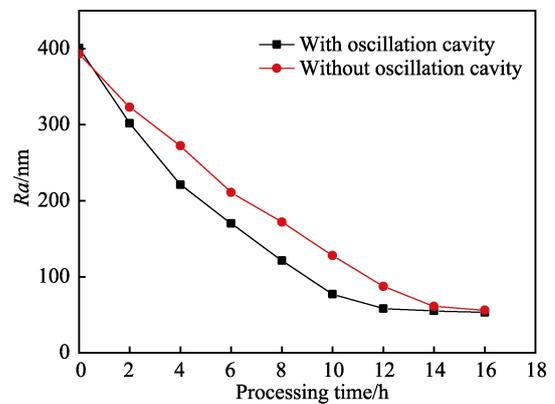


图 17 内表面同一检测点的粗糙度变化

Fig.17 Roughness variation on the inner surface of a monitoring point

通过白光干涉表面轮廓仪测量，去除形状后的表面纹理轮廓如图 18 所示。壁面在单向磨粒流的作用下能观察到一定的抛光液流动痕迹。其中，无自激振荡腔体的情况下，壁面轮廓沿流动方向的痕迹较明显，而有自激振荡腔体情况下，壁面表面轮廓的纹理单向性有一定的改善。加工后 14 h 后，不锈钢细管内壁有显著镜面效果，如图 19 所示。

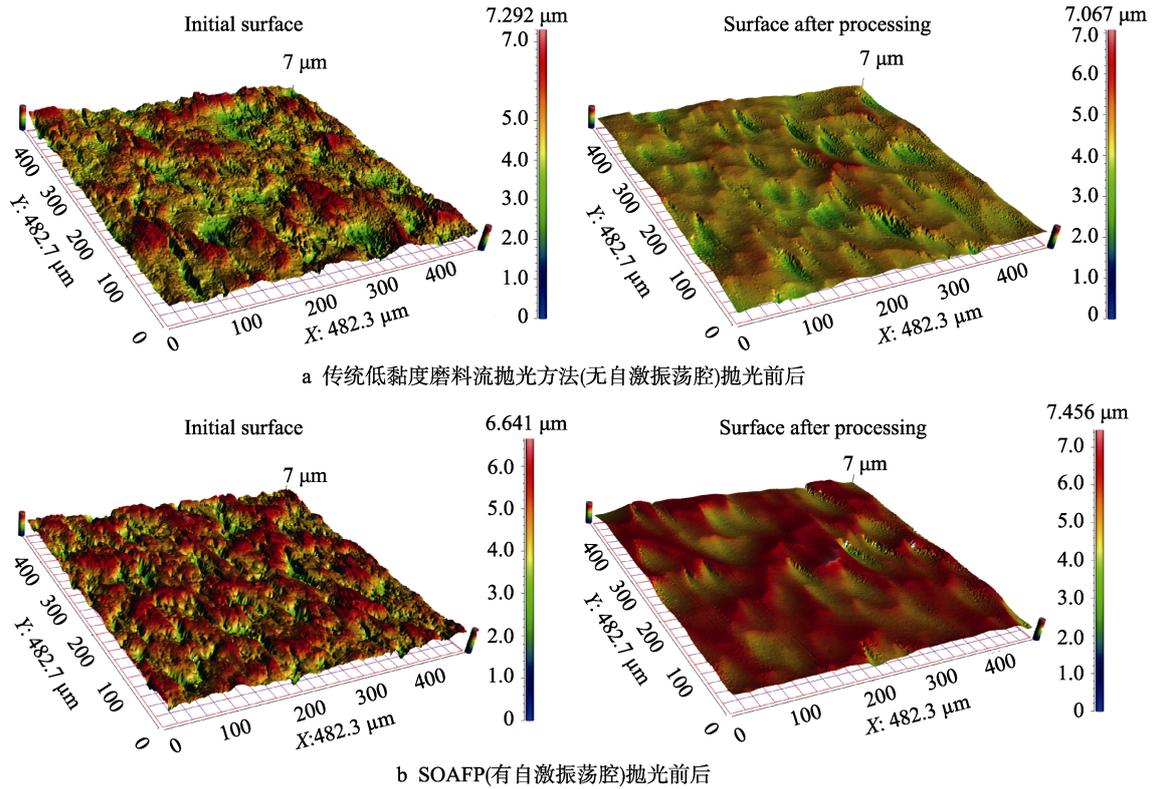


图 18 有无自激振荡腔磨粒流抛光不锈钢管件内表面轮廓对比图

Fig.18 Comparison of the polished stainless steel pipe with (a) or without (b) self-oscillation cavity

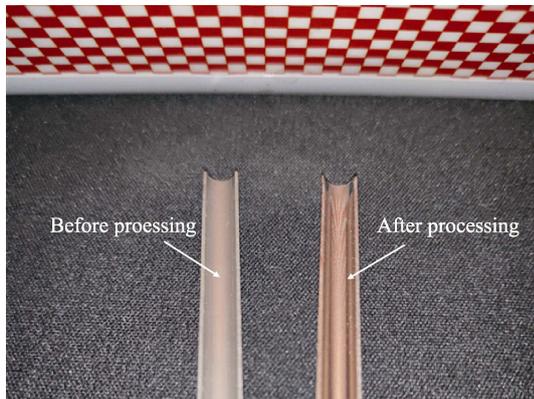


图 19 自激振荡脉冲磨粒加工不锈钢管件管壁前后内表面对比

Fig.19 Stainless steel pipe wall before and after SOAFP

4 结论

1) 根据自激振荡脉动原理, 建立了考虑 SOAFP 的约束流道动力学模型, 并进行了数值模拟, 获得了管件流道内的速度波动以及湍动能分布图, 证明了自激振荡脉冲效应能增强磨粒流的峰值载荷以及湍流强度。

2) 仿真优化了自激振荡腔体的结构参数 d_2/d_1 与 L/D , 即 $d_2/d_1=1.6$, $L/D=0.5$, 过渡角 $\beta=60^\circ$, 并进行了实验验证。SOAFP 能使不锈钢内壁的粗糙

度 Ra 从 480 nm 降到 50 nm 左右, 并且比无振荡腔的加工时间缩短了 2 h 左右。

3) 开展了有自激振荡腔和无自激振荡腔抛光不锈钢管件内壁对比实验。结果表明, 有自激振荡脉冲效应的 SOAFP 能明显增强磨粒流对工件的峰值载荷和流道内的湍流强度, 缩短抛光时间, 提高磨粒流的加工效率。壁面表面轮廓的纹理单向性有一定的改善, 抛光 14 h 后, 不锈钢细管内壁有明显镜面效果。

参考文献:

[1] HUISSOON J P, ISMAIL F, JAFARI A, et al. Automated polishing of die steel surfaces[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2002, 19(4): 285-290.

[2] CHEUNG C F, WANG C J, CAO Z C, et al. Development of a multi-jet polishing process for inner surface finishing [J]. Precision engineering, 2017, 52: S0141635917302635.

[3] 刘亚丹, 葛晓宏, 黄红武. 新型精密模具表面镜面加工技术[J]. 机电技术, 2008, 31(1): 39-41.

LIU Yadan, GE Xiaohong, HUANG Hongwu. Surface finishing technology of new precision mold[J]. Electro-mechanical technology, 2008, 31(1): 39-41.

[4] 庞桂兵, 翟小兵, 徐文骥, 等. 模具型腔表面电化学机械光整加工技术[J]. 模具工业, 2009, 35(3): 55-59.

PANG Gui-bing, ZHAI Xiao-bing, XU Wen-ji, et al. Electrochemical mechanical finishing technology for mold

- cavity surface[J]. Die & mould industry, 2009, 35(3): 55-59.
- [5] 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.
KANG Guiwen. Research status and development of magnetorheological polishing technology[J]. Machine tool & hydraulics, 2008, 36(3): 173-175.
- [6] ALAM Z, IQBAL F, GANESAN S, et al. Nanofinishing of 3D surfaces by automated five-axis CNC ball end magnetorheological finishing machine using customized controller[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 100(5-8): 1031-1042.
- [7] 周宪明. 环保型铜和铝表面的电化学抛光[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
ZHOU Xianming. Electrochemical polishing of environmentally friendly copper and aluminum surfaces[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.
- [8] TILEY J K, SHIVELEY I I, VISWANATHAN G B, et al. Novel automatic electrochemical-mechanical polishing (ECMP) of metals for scanning electron microscopy[J]. Micron, 2010, 41(6): 615-621.
- [9] JAIN V K, ADSUL S G. Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM)[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2000, 40(7): 1003-1021.
- [10] KENDA J, DUHOVNIK J, TAVČAR J, et al. Abrasive flow machining applied to plastic gear matrix polishing [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2014, 71(1-4): 141-151.
- [11] 赵磊. 小孔磨粒流抛光技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
ZHAO Lei. Research on small hole abrasive flow polishing technology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
- [12] LARRY L, PATER Ph D. PAUL H BORST. An extrusion-type pulsed jet device[J]. WJAT, 1998, 3(2): 87-103.
- [13] SEMKO A N. Fluctuating powder-driven pulsed water jet[J]. Journal of mathematical sciences, 2001, 103(3): 418-422.
- [14] KNISELY C, ROCKWELL D. Self-sustained low-frequency components in an impinging shear layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 116: 157-186.
- [15] ROCKWELL D, NAUDASCHER E. Self-Sustained oscillations of impinging free shear layers[J]. Annual review of fluid mechanics, 1979, 11(1): 67-94.
- [16] KIMURA I, HOSODA T. A non-linear $k-\epsilon$ model with realizability for prediction of flows around bluff bodies [J]. International journal for numerical methods in fluids, 2010, 42(8): 813-837.
- [17] CROW S C, CHAMPAGNE F H. Orderly structure in jet turbulence[J]. Journal of fluid mechanics, 1971, 48(3): 547-591.
- [18] LUO Z C. Fluid network theory[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1988.
- [19] ROCKWELL D O. Prediction of oscillation frequencies for unstable flow past cavities[J]. Trans asme J fluids Eng, 1977, 99(2): 294-300.
- [20] JIARONG F, ZHAOHUI W, SI C. Self-excited oscillation frequency characteristics of a paralleled pulsed jet nozzle [J]. Energy procedia, 2017, 141: 619-624.
- [21] ROCKWELL D, NAUDASCHER E. Review-self-sustaining oscillations of flow past cavity[J]. Fluid engineering, 1978, 100(2): 152.
- (上接第 354 页)
- [11] 李伯民, 赵波, 李清. 磨料、磨具与磨削技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
LI Bo-min, ZHAO Bo, LI Qing. Abrasives, grinding tools and grinding technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [12] 林旺票, 王洁, 杭伟等. 玻璃材料高速抛光用固着磨料磨具试验研究[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 141-146.
LIN Wang-piao, WANG Jie, HANG Wei, et al. Experimental research on fixed abrasives and abrasive tools for high-speed polishing of glass material[J]. Surface technology, 2015, 44(4): 141-146.
- [13] 邓乾发, 袁巨龙, 文东辉, 等. 半固着磨具在非晶态 NiPdP 合金薄膜铜片衬底精密研磨中的应用[J]. 表面技术, 2009, 38(8): 1-6.
DENG Qian-fa, YUAN Ju-long, WEN Dong-hui, et al. Approach to semi-fixed abrasive grinding plate on surface lapping copper substrates of amorphous Ni-Pd-P alloy films[J]. Surface technology, 2009, 38(8): 1-6.
- [14] MARINESCU I D, UHLMANN E, DOI T. Handbook of lapping and polishing[M]. Florida: CRC Press, 2006.
- [15] KIM H M, MANIVANNAN R, MOON D J, et al. Evaluation of double sided lapping using a fixed abrasive pad for sapphire substrates[J]. Wear, 2013, 302: 1340-1344.
- [16] 刘幸龙. 固结磨料研磨 SiC 晶体基片研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
LIU Xing-long. Study on fix-abrasive lapping SiC crystal substrate[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013.
- [17] 朱楠楠. 铌酸锂晶体的固结磨料高效低损伤研抛机理与工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
ZHU Nan-nan. Mechanism and process research of lithium niobate lapping and polishing by fixed abrasive pad with a high efficiency and low damage[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.