

软性磨粒旋转射流抛光圆管内壁仿真与实验

项永超, 朱安南, 程煜

景德镇艺术职业大学, 江西 景德镇 333000

DOI: 10.61369/VDE.2025120039

摘要 : 为提升圆管内壁抛光质量与效率, 提出软性磨粒旋转射流抛光方法。基于计算流体力学软件, 建立该抛光过程的数学模型, 对不同参数下圆管内壁流场特性及磨粒运动轨迹进行仿真分析。搭建实验平台, 开展抛光实验, 验证仿真结果并探究工艺参数对抛光效果的影响。研究表明, 仿真与实验结果吻合良好, 该方法能有效改善圆管内壁表面质量, 为圆管内壁精密抛光提供了新途径。

关键词 : 软性磨粒; 旋转射流; 圆管内壁; 仿真; 实验

Simulation and Experiment of Soft Abrasive Rotary Jet Polishing for Inner Wall of Circular Pipe

Xiang Yongchao, Zhu Annan, Cheng Yu

Jingdezhen Vocational University of Art, Jingdezhen, Jiangxi 333000

Abstract : To improve the polishing quality and efficiency of the inner wall of circular pipes, a soft abrasive rotary jet polishing method is proposed. Based on computational fluid dynamics software, a mathematical model of the polishing process is established to simulate and analyze the flow field characteristics of the inner wall of the circular pipe and the movement trajectory of abrasive particles under different parameters. An experimental platform is built to carry out polishing experiments, verify the simulation results and explore the influence of process parameters on the polishing effect. The research shows that the simulation results are in good agreement with the experimental results, and this method can effectively improve the surface quality of the inner wall of circular pipes, providing a new approach for the precision polishing of the inner wall of circular pipes.

Keywords : soft abrasive; rotary jet; inner wall of circular pipe; simulation; experiment

引言

软磨粒旋转喷流抛光是融合了软磨粒流加工和旋转喷流的一种抛光技术。旋转喷流抛光结合了旋转喷流技术抛光法和软磨料流加工抛光法的特点, 使用旋转喷流抛光可以增加磨粒和内壁之间的碰撞与摩擦, 从而达到去除工件表面材料的作用, 同时旋转喷流还可以使得磨粒在圆周方向进行均匀的排列, 可以使磨粒与圆管壁面充分接触, 从而保证了工件表面抛光的均匀性^[1]。软磨料具有一定的韧性与弹性, 软磨粒与工件碰撞的时候能够适配表面粗糙度, 减少对工件表面造成的损害。旋转喷流抛光是依靠旋转喷射实现抛光的过程, 可增加磨粒与工件内壁的接触面积与作用时间, 有效提高抛光效率与抛光均匀度。目前针对软磨粒旋转喷流抛光圆管内壁的研究尚属少见, 且关于软磨料旋转喷流抛光圆管内壁抛光机理、抛光工艺参数优化以及仿真模型准确性等问题还存在诸多需要进一步探究和解决的问题, 故需要对其展开相应的仿真实验研究^[2]。

一、软性磨粒旋转射流抛光原理

软磨料旋转射流抛光系统主要包括旋转射流装置、软磨料供给系统、圆管固定装置和控制系统等。其中旋转射流装置作为软磨料旋转射流抛光系统的关键设备, 它的主要功能是将高压流体转化成为高速旋转的射流, 其常见由喷嘴、旋转轴和驱动电机等结构组成。喷嘴的形状和尺寸对旋转射流的影响极大, 合理设计

喷嘴结构有助于提高射流速度以及其旋转的稳定性。软磨料供给系统主要起到将含有软磨料的抛光液输送到旋转射流装置中的作用, 软磨料供给系统一般由储液罐、泵体、管道和阀门等组成, 在旋转射流装置进行抛光作业时需要使用泵体将抛光液输送过来, 在其调节泵体的流量以及压力时, 可以调节抛光液的进给速度以及压力。圆管固定装置主要用于固定抛光圆管, 从而使抛光的圆管在抛光过程中不会产生位移和振动, 其一般采用夹具和卡

盘等结构，在圆管尺寸和形状的不同情况之下可以进行调整。控制系统主要对软磨料旋转射流抛光系统的相关参数进行自动控制，主要包括对旋转射流装置的转速、抛光液的流量和压力、抛光的时间等参数的控制和调节，通过系统的控制可以使整个抛光的作业能够稳定运行，起到精确控制抛光作用。

它的机理为：高速旋转射流装置，在旋流下软磨粒抛光液以高速的旋流射到圆管内壁，在旋流射流的作用下，软磨粒在离心力与流体力的作用下以不同角度及大小的速度撞击圆管内壁表面，达到磨粒与内壁表面机械碰撞及摩擦作用，从而达到去除材料的目的。圆管内表面高速旋转的射流携磨粒撞击圆管内壁表面，磨粒与内壁面碰撞受到冲击力作用和摩擦力作用，冲击力作用下磨粒嵌入内壁面表面，摩擦力作用下，内壁表面的凸起被去除，同时软磨粒具有一定的弹性，可以与圆管内壁表面的微观凹凸性相适应，从而降低磨粒对圆管内壁表面造成的磨粒划伤。在抛光过程中随着材料去除量增加，圆管内表面的表面粗糙度减小，圆管的内表面质量得到提高^[3]。同时，在射流作用下抛光液不断循环流动，能够及时带走抛光过程中产生碎屑及热量，防止抛光碎屑对抛光表面划伤，以及在磨料作用下产生的热量对工件表面的温度影响，以免工件表面发生形变^[4]。

二、仿真模型建立

(一) 控制方程

本文用计算流体动力学(CFD)法模拟软性磨粒旋喷流抛光。CFD法是使用数学计算流体力学技术求解流体力学问题，用来分析、预测和模拟流体运动的速度场、压力场、温度场等分布规律，是指导工程设计或研究分析的有效理论依据。抛光液为固液两相流，采用欧拉-拉格朗日描述两相流^[5]。欧拉法对流体采用连续介质，用控制方程描述流场宏观运动；拉格朗日法通过跟踪单个颗粒的运动，对离散的颗粒施加外力，考察颗粒间的相互影响。连续相(抛光液)控制方程为纳维斯托克斯方程，离散相(磨粒)运动方程由牛顿第二定律确定^[6]。

(二) 模型假设

为简化计算，对仿真模型做以下假设：

抛光液是一种不可压牛顿流体。不可压流体假定的含义是流体的密度是随流动情况变化而保持不变，在低速流动的情况下是可以接受的；牛顿流体假定是流体的黏性应力正比于应变率，它有利于流体的数学描述及数值计算。

假设磨粒为刚性球，在抛光液里均匀分布，并且磨粒无相互作用。将磨粒抽象为刚体可以方便简化对磨粒的运动轨迹计算；假设磨粒均匀分布并不存在相互作用，能够简化模型，避免因为磨粒之间的碰撞以及摩擦对抛光过程造成的影响。

忽略重力作用下磨粒运动。抛光运动中，磨粒受到的流体曳力要远大于磨粒所受重力，因此，忽略重力作用下磨粒运动对仿真结果的影响。

圆管内壁为光滑壁面，不考虑内壁微观粗糙度对磨粒运动的影响。假设圆管内壁为光滑壁面可以简化边界条件的设置，便于

进行数值模拟；虽然实际圆管内壁存在微观粗糙度，但在初步研究中可以忽略其对磨粒运动的影响，后续可以通过实验进行修正。

(三) 网格划分

采用 ICEMCFD 软件对圆管模型进行网格划分。ICEMCFD 是一款专业的网格生成软件，功能强大，具有优质的网格质量，利用 ICEMCFD 完成网格划分首先需要创建圆管的几何模型，在建立圆管的几何模型时，按照圆管的实际尺寸、形状设定长度、内径及外径等参数，为达到计算精度的要求在圆管内壁附近进行网格加密，因为圆管内壁附近是磨粒与圆管内壁接触的主要部位，因此将这一区域的网格进行加密能够更加精确地捕捉流场的变化和磨粒的运动轨迹。通过网格无关性验证，选出合适的网格数量。网格无关性验证是将不同网格数量的网格进行仿真处理，网格数量多至某点时仿真结果不再发生变化，此时的网格数量就是合适的网格数量，通过网格无关性验证，既可以避免由于网格数量过少而造成计算误差过大，又可以避免由于网格数量过多而造成计算量太大。

(四) 边界条件设置

入口边界条件：设置抛光液入口的速度和磨粒的体积分数。入口流速依据实际实验的泵的流量和管道大小而定，磨粒体积分数根据实验的配方设定。仿真时，通过改变入口流速和磨粒体积分数对抛光效果进行研究^[7]。

出口边界条件：采用压力出口边界条件，出口压力设为大气压。压力出口边界条件适用于流体在出口处压力已知的情况，将出口压力设为大气压符合实际情况，能够保证流体在出口处自由流动^[8]。

壁面边界条件：圆管内壁设为无滑移壁面，即流体在壁面处的速度为零，这符合实际流体流动的情况；旋转射流装置壁面设为旋转壁面，根据旋转射流装置的转速设置其旋转速度，以模拟旋转射流的形成过程。

(五) 求解器选择

选用 Fluent 软件进行求解，Fluent 是一款功能强大的计算流体力学软件，能够求解各种复杂的流体流动问题。采用 SIMPLE 算法求解压力-速度耦合方程，SIMPLE 算法是一种常用的压力修正算法，具有计算稳定、收敛速度快等优点。离散相采用 DPM 模型进行模拟，DPM 模型是 Fluent 软件中的一种离散相模型，能够跟踪离散颗粒的运动轨迹，并考虑颗粒与流体之间的相互作用。在求解过程中，需要设置合适的计算参数，如迭代次数、收敛精度等，以保证仿真结果的准确性和可靠性^[9]。

三、实验研究

(一) 实验装置搭建

根据软性磨粒旋转射流抛光原理设计实验平台，主要实验设备由旋转射流装置、软性磨粒供给系统、圆管固定装置、动力系统和测量系统组成。旋转射流装置由电机提供动力，可以控制不同的旋转速度，选择高精密伺服电机驱动，可以控制旋转的精确

速度，其最大可调速度为0~3000r/min。软性磨粒供给系统利用蠕动泵将含有磨粒的抛光液输送至旋转射流装置中，蠕动泵流量稳定，精准度高，可以精准控制抛光液输入速度，流量可控在0~500ml/min范围之内。圆管固定装置主要用于固定圆管，在抛光过程中对圆管进行稳定固定，圆管固定装置使用三爪卡盘结构，其可适应不同尺寸的圆管，夹紧精度较高。动力系统为整个装置提供动力来源，由电机电源和泵体电源构成，电源系统可以稳压和稳流，对装置的稳定运行有作用。测量系统利用表面粗糙度仪和电子天平分别测量抛光前后的圆管内壁的表面粗糙度变化和质量变化，表面粗糙度仪测量精度为0.001μm，电子天平测量精度为0.0001g，能满足实验测量精准度的要求。

(二) 实验材料与参数

实验采用内径20mm、长度100mm不锈钢圆管作为工件。不锈钢具有良好的机械性能及耐腐蚀性能，在工农业领域应用广泛，以不锈钢圆管作为实验工件具有一定的代表性。软磨粒选用了粒径50μm的碳化硅磨粒，由于碳化硅硬度较高、耐磨性较好，适合于金属材料抛光，磨粒体积分数分别设置为5%、10%、15%。射流旋转速度设置为1000r/min、1500r/min、2000r/min，旋转射流速度分别以软磨粒在抛光液中搅拌时产生的磨粒体积流量、单位时间单位体积抛光液流动的距离来表示。每个实验条件进行3次重复实验，取平均值作为实验结果，以减少实验误差，提高实验结果可靠性。

(三) 实验步骤

首先清洗不锈钢圆管，用粗糙度测量仪、电子秤测量圆管内壁初始表面粗糙度、初始质量。清洗圆管的目的是去除表面的油污、灰尘、氧化皮等杂质，以免影响实验。测量初始表面粗糙度及初始质量时需要在圆管不同位置进行数次测量，取其平均值为初始值。

其次，根据实验参数设置磨粒体积分数不同的抛光液，再配套软性磨粒供给系统。抛光液的制作包括磨粒、水、分散剂、润滑剂按一定比例混合均匀，利用搅拌器搅拌一定时间，确保磨粒能够均匀分布于抛光液中。

然后，将圆管放置在圆管固定装置上，将旋转射流装置调整到适合圆管相对位置，使得旋转射流均匀喷射到圆管内壁上。调整相对位置时通过显微镜观察射流分布在圆管内壁上的情况，使得射流覆盖整个内壁。

最后，开启动力装置和旋转射流装置，设定旋转射流速度，且开启软性磨粒供给系统，令抛光液一定量输入旋转射流装置，生成旋转射流作用于圆管内表面进行抛光。抛光持续10min。抛光操作中需实时检查设备工作状态，包括旋转速度、流量、压力^[10]。

四、结论

第一，建立了软性磨粒旋转射流抛光圆管内壁的仿真模型，通过仿真分析了流场特性、磨粒运动轨迹以及工艺参数对抛光效果的影响规律，为实验研究提供了理论指导。

第二，搭建了实验平台，开展了抛光实验，验证了仿真结果的正确性。实验结果表明，软性磨粒旋转射流抛光方法能有效改善圆管内壁表面质量，在一定工艺参数下可获得较好的抛光效果。

第三，研究了旋转射流速度、磨粒粒径和磨粒体积分数等工艺参数对抛光效果的影响，得到了优化的工艺参数组合，为圆管内壁精密抛光提供了技术支持。后续研究可进一步深入探究抛光机理，优化抛光工艺，提高抛光效率和表面质量，拓展该技术在实际工程中的应用。

参考文献

- [1] 项永超. 基于软性磨粒旋转射流抛光技术的材料去除 [J]. 中国新技术新产品, 2024, (16):23~25.
- [2] 张经豪, 熊平, 郝睿智, 等. 基于导热反问题圆管内壁腐蚀减薄及污垢增厚的识别 [J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2022, 49(01):98~105.
- [3] 张经豪, 卢涛, 熊平, 等. 二维圆管导热反问题内壁瞬态温度的快速识别 [J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2021, 48(06):64~72.
- [4] 孙会芹, 韩昌亮, 李泽宇, 等. 水平圆管内超临界甲烷非均匀流场的对流传热特性 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2021, 26(03):51~57.
- [5] 阮永蔚. 热液条件下颗粒对竖直圆管内壁的黏附机理研究 [D]. 浙江大学, 2021.
- [6] 刘志强. 面向圆管及多边钢管内壁的喷砂机的设计与应用 [J]. 中国铸造装备与技术, 2023, 54(02):67~70.
- [7] 俞鑫炉, 董新龙, 潘顺吉. 不同爆炸载荷下 TA2 钛合金圆管膨胀破坏过程 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 38(01):148~154.
- [8] 李春永. T型圆管中冷热流体混合过程大涡模拟及管内壁面温度导热反问题研究 [D]. 北京化工大学, 2021.
- [9] 卢涛, 刘波, 卢红光. Levenberg-Marquardt 算法求解三维圆管稳态导热反问题 [J]. 热科学与技术, 2023, 9(02):133~138.
- [10] 赵彦霞. 细长圆管内低气压直流放电中等离子体特性的数值研究 [D]. 大连理工大学, 2020.