

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.01.003

增材制件内腔微细流道水基磨粒流光整加工流场仿真 与试验验证

曹文涛, 孙玉利, 闫哲, 杨范轩, 卢文壮, 左敦稳
(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要: 针对增材制件内腔微细流道存在的表面质量差及抛光均匀性不佳问题, 鉴于传统光整加工方法不适用且单向加工存在局限, 本文采用双向光整加工模式, 结合仿真与试验, 系统研究了碳化硅与氧化铝两种水基磨料在单向和双向加工条件下对流道扩孔均匀性、表面粗糙度及表面形貌的影响。研究表明: 相较单向加工, 双向加工显著改善了流道抛光均匀性, 使采用碳化硅磨料加工的流道入口与出口扩孔量差异从 $51\ \mu\text{m}$ 缩小至 $27\ \mu\text{m}$, 采用氧化铝磨料加工的流道差异则从 $40\ \mu\text{m}$ 缩小至 $20\ \mu\text{m}$; 同时, 双向加工后各区域表面粗糙度明显降低且更均匀: 碳化硅磨料加工的流道入口、出口及中间区域粗糙度分别降至 3.726 、 3.612 和 $3.639\ \mu\text{m}$, 氧化铝磨料加工的流道相应区域则降至 4.127 、 3.876 和 $3.963\ \mu\text{m}$ 。对比两种磨料, 碳化硅的抛光性能优于氧化铝, 在双向加工模式下, 其加工的流道表面粗糙度比氧化铝加工的流道平均低约 $0.3\ \mu\text{m}$ (入口低 $0.4\ \mu\text{m}$, 出口低 $0.26\ \mu\text{m}$, 中间低 $0.32\ \mu\text{m}$)。

关键词: 水基磨粒流光整加工; 增材制造; 内腔微细流道; 单/双向加工; 光整均匀性

中图分类号: TH161.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2026)01-0046-12

Flow Field Simulation and Experimental Validation of Water-Based Abrasive Flow Machining for Internal Micro-channels in Additively Manufactured Components

CAO Wentao, SUN Yuli, YAN Zhe, YANG Fanxuan, LU Wenzhuang, ZUO Dunwen
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: To address the poor surface quality and non-uniform polishing in internal micro-channels of additively manufactured components, where traditional finishing methods are inapplicable and unidirectional processing exhibits limitations, this study adopts a bidirectional finishing mode. Combining simulation and experimentation, it systematically investigates the effects of water-based silicon carbide (SiC) and alumina (Al_2O_3) abrasives on hole enlargement uniformity, surface roughness, and surface morphology under both unidirectional and bidirectional processing conditions. Results demonstrate that bidirectional processing significantly improves polishing uniformity compared with unidirectional processing. Specifically, the difference in hole enlargement between inlet and outlet is reduced from $51\ \mu\text{m}$ to $27\ \mu\text{m}$ using SiC abrasives, and from $40\ \mu\text{m}$ to $20\ \mu\text{m}$ using Al_2O_3 abrasives. Furthermore, bidirectional processing markedly reduces and homogenizes surface roughness across all regions: Roughness values in SiC-processed channels decrease to

基金项目: 南京航空航天大学博士拔尖人才跨学科创新基金(KXKXJJ202404)。

收稿日期: 2025-06-20; **修订日期:** 2025-09-17

通信作者: 孙玉利, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: sunyuli@nuaa.edu.cn。

引用格式: 曹文涛, 孙玉利, 闫哲, 等. 增材制件内腔微细流道水基磨粒流光整加工流场仿真与试验验证[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(1):46-57. CAO Wentao, SUN Yuli, YAN Zhe, et al. Flow field simulation and experimental validation of water-based abrasive flow machining for internal micro-channels in additively manufactured components[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2026, 58(1):46-57.

3.726 (inlet), 3.612 (outlet), and 3.639 μm (middle), while those in Al_2O_3 -processed channels decrease to 4.127 (inlet), 3.876 (outlet), and 3.963 μm (middle). Comparative analysis indicates SiC outperforms Al_2O_3 , yielding channels with an average surface roughness approximately 0.3 μm lower under bidirectional processing (inlet: 0.4 μm lower, outlet: 0.26 μm lower, middle: 0.32 μm lower).

Key words: water-based abrasive flow machining; additive manufacturing; internal micro-channels; unidirectional/bidirectional processing; finishing uniformity

液压集成阀块作为液压系统的核心控制单元^[1],通过内部精密流道网络实现动力传递与分配功能,广泛应用于航空航天领域,其集成化设计可显著提升系统可靠性并简化维护流程。然而,传统制造工艺依赖钻孔加工交叉流道,需通过大量工艺孔实现流道连通,导致阀块结构冗余、体积庞大。增材制造技术为突破传统工艺瓶颈提供了新途径。该技术通过逐层堆积金属粉末实现阀块整体成形,无须工艺孔即可直接构建三维异形流道,显著提升了设计自由度。相较于传统工艺,增材制造可消除冗余结构^[2],使阀块体积与重量分别降低 30% 和 50% 以上。然而,增材制造逐层堆叠的工艺特性导致内流道表面易产生球化黏粉、微裂纹及阶梯状形貌缺陷,表面粗糙度普遍高于传统机加工水平。粗糙的内流道表面会引发流体湍流效应,显著增加流动阻力与压力损失,直接影响液压系统的工作效率与稳定性。杨阳等^[3]针对增材制造成形的液压流道进行沿程损失研究,试验结果表明:在相同工况下,轮廓精度较低、表面粗糙度较高的增材制造流道,其沿程压力损失比传统加工流道更大。因此,亟须开发针对液压集成阀块内流道^[4]的表面光整加工技术,通过提高内流道的表面质量来减少流体流动阻力与能量损失,提升液压系统的效率与稳定性。

目前,针对增材制件内腔微细流道表面有多种光整加工技术。现有光整加工技术中,磨粒流抛光技术^[5-6]虽可实现部分复杂内流道的抛光,但对于具有微细复杂走向特征的内流道,易出现磨粒嵌入表面、介质残留清洗困难等问题,且受“壁面效应”影响,流道进出口附近易产生“过抛”或“欠抛”现象;软性磨料流^[7]加工技术的弱黏性流体磨料能够与小尺寸或复杂形状的结构化表面形成良好接触,且光整过程中的微力微量切削,不会造成结构化表面损伤,但是由于这种良好接触,导致其加工效率大幅下降;磁力研磨技术^[8]适用于部分盲腔结构的光整加工,但是对于增材制造件内腔微细流道而言,其内部磁场分布具有高度非均匀性且难以建模预测,致使磁性磨料在流道内的运动轨迹呈现显著随机性,从而导致研磨过程的可控性降低及工艺稳

定性下降。激光抛光^[9]则因微细流道几何约束产生光路干涉,无法加工内流道表面。上述技术缺陷使得传统磨粒流、软性磨粒流、磁力研磨及激光抛光均不适用于增材制件内腔微细流道的加工。相比之下,水基磨粒流^[10]抛光技术通过优化介质流动性,在保证加工效率的同时解决了上述技术所面临的问题,展现出对增材制件内腔微细流道^[11]表面的独特工艺适应性。

近年来,水基磨粒流光整加工技术在内腔微细流道抛光领域得到了较多关注。刘鑫^[12]搭建了水基磨粒流加工设备,并验证了供液压力与磨料浓度对小孔的光整有积极影响效果。Liu 等^[13]研究了不同磨料对气膜孔的抛光效果,重点分析了出入口抛光的均匀性,但对中间区域的抛光效果研究不足。潘峥正等^[14]研究了后混合式中磨料颗粒的运动情况,得出只有大约 20% 水射流动能传递给磨粒,这可能导致水基磨料材料去除率不够。夏三星^[15]利用超声辅助磨料水射流技术成功去除不锈钢细长导管相贯孔部位的毛刺,其研究表明使用碳化硅磨粒的水基磨料在特定参数下可实现高效去毛刺效果。这些研究为该技术的实际应用提供了参考。然而,现有的水基磨粒流光整加工技术研究多聚焦于单一磨粒类型或单向加工模式下的工艺参数优化,对多类磨粒特性差异及双向/单向加工模式的系统性对比分析仍较为匮乏。因此,本文以增材制造的 AlSi10Mg 微细流道^[16-17]为研究对象,结合仿真与试验验证,系统研究磨粒种类、加工方式及加工时间对微细流道表面加工效果的影响规律。

1 水基磨粒流光整加工原理及材料去除机理

水基磨粒流光整加工技术是以低浓度磨料混合液为工作介质,在高压驱动下流体经微小孔道时因流道收缩而急剧加速,带动磨粒获得高动能。同时,在壁面湍流效应作用下,磨粒与孔壁间摩擦阻力显著增强,促使高速磨粒以多角度高频冲击表面,通过剪切、划擦^[18]及犁耕等复合作用剥离微观裂纹、球化粘粉等缺陷,同时湍流扰动保障磨粒均匀分布,最终实现均匀微量材料去除,使内流道孔

壁表面粗糙度显著降低并形成高质量光整表面。水基磨粒流抛光内流道原理如图 1 所示。

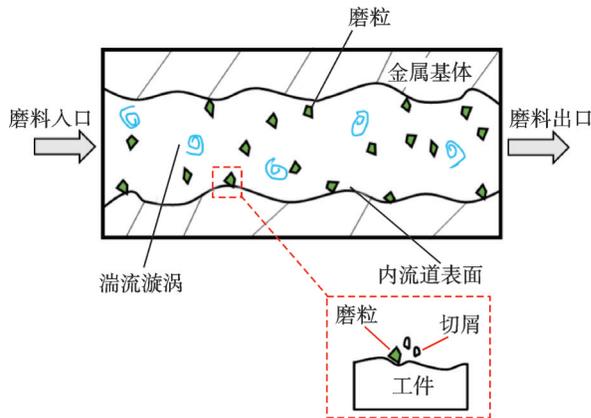


图 1 水基磨粒流抛光内流道原理图

Fig.1 Schematic diagram of water-based abrasive flow machining for internal channel polishing

水基磨粒流加工系统由动力系统、循环供液系统及工装系统 3 部分构成,其中动力系统由泵组、卸压阀和脉冲阻尼器等部件组成,通过高压管道向加工区输送水基磨料;循环供液系统以水基磨料的供给与回收构成闭环回路,系统运行时通过搅拌装置使磨料充分混合,经加压后注入微细流道进行加工,加工完成后磨料回流至储料桶实现循环利用;工装系统则包含针对工件特制的工装夹具、V 形支撑块及工作平台。水基磨粒流加工系统原理示意图如图 2 所示。

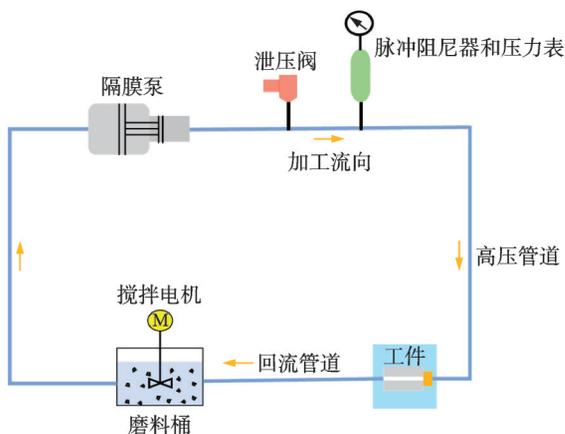


图 2 水基磨粒流加工系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of water-based abrasive flow machining system

2 水基磨粒流光整加工流场仿真

仿真分析采用广泛应用的 Fluent 软件,对微细流道内液体与固体颗粒的混合运动进行模拟研究。通过建立数字化模型,不仅能够直观展现流道内流体与颗粒的实时分布状态,还能量化分析不同参数对流动特性的影响,有效克服实际试验中微观

流场观测困难、重复试验成本高等问题。

根据流动管道、夹具结构及目标流道结构建立了如图 3 所示的微细流道二维模型:a 区域为水基磨料流动管道及夹具内腔,其直径 20 mm,长度 60 mm;b 区域为微流道内腔,流道直径 2 mm,流道长 20 mm;A 为水基磨料入口(inlet);B 为出口(outlet),C 为壁面(wall)。由于流道模型中存在流道截面突变及流道壁面等关键区域,这些位置的流动特征对抛光效果影响显著,因此网格划分对上述区域进行了局部网格加密处理。网格划分如图 4 所示,网格节点数为 32 261(单元数 31 478)。

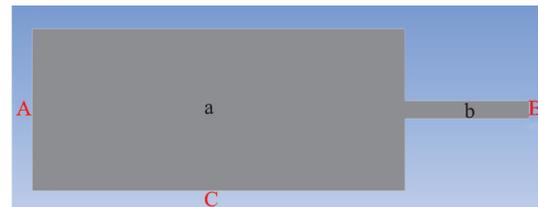


图 3 流道二维模型

Fig.3 Two-dimensional model of the micro-channel

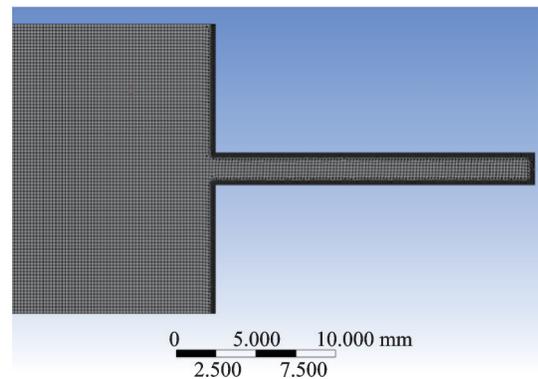


图 4 流道网格划分

Fig.4 Mesh generation of the micro-channel

磨料浓度为 2% (质量分数) 的水基体系属于典型的低浓度牛顿流体体系^[19],决定使用离散相模型 (Discrete phase model, DPM) 计算得流道内雷诺数为 95 500,远高于湍流雷诺数 4 000,湍流模型选择 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型。计算选择压力基求解器,固体相为碳化硅或氧化铝,液相为水。本研究旨在对比不同区域的光整效果差异,而非绝对的材料去除量,因此将带有棱角的磨粒简化为球形。同时,由于流道尺寸远大于磨粒粒径波动范围,这种微小的粒径差别对磨粒在不同区域的浓度分布趋势影响甚微,可忽略不计。为在保证试验目的的同时减少计算成本,最终将所有颗粒统一简化为直径 20 μm 的球形模型。同时从入口面均匀喷射颗粒,入口设为压力入口,出口对应环境压力,仿真边界条件及相关参数如表 1 所示。

以粒径 20 μm 、质量浓度 2% 的碳化硅磨粒为固定参数,通过改变入口压力(0.5/1/1.5/2 MPa)

表 1 仿真边界条件及相关参数

Table 1 Simulation boundary conditions and related parameters

边界条件及相关参数	规格
模型	DPM, Realizable $k-\epsilon$
磨粒属性	直径 20 μm 的球形磨粒
磨料质量分数/%	2
入口压力/MPa	0.5、1、1.5、2
出口压力/MPa	环境压力
磨粒注入方式	面喷射

开展流场仿真研究。图 5 和 6 分别为液相流体速度分布与动压分布云图。仿真结果表明:入口压力提

升使流道内的流动强度呈现上升趋势,液相流速与动压随之升高。在微细直流道结构中,液相流体整体呈现相对均匀的速度分布特征,但存在一定的边界层效应,入口段近壁区域附近流速梯度略明显,而中间段与出口段的流速分布相对平缓。动压分布表现出较为明显的梯度变化,入口近壁区域处动压值较低,随着流动深度增加,中间段及出口段近壁区域动压逐步提升。

水基磨料的冲蚀性能与固相磨粒的冲蚀性能直接相关。固相磨粒的动压特性直接反映了其冲蚀动能的强弱,动压值的增加通常意味着更高的材料去除效率。对于特定类型和尺寸的磨粒而言,其

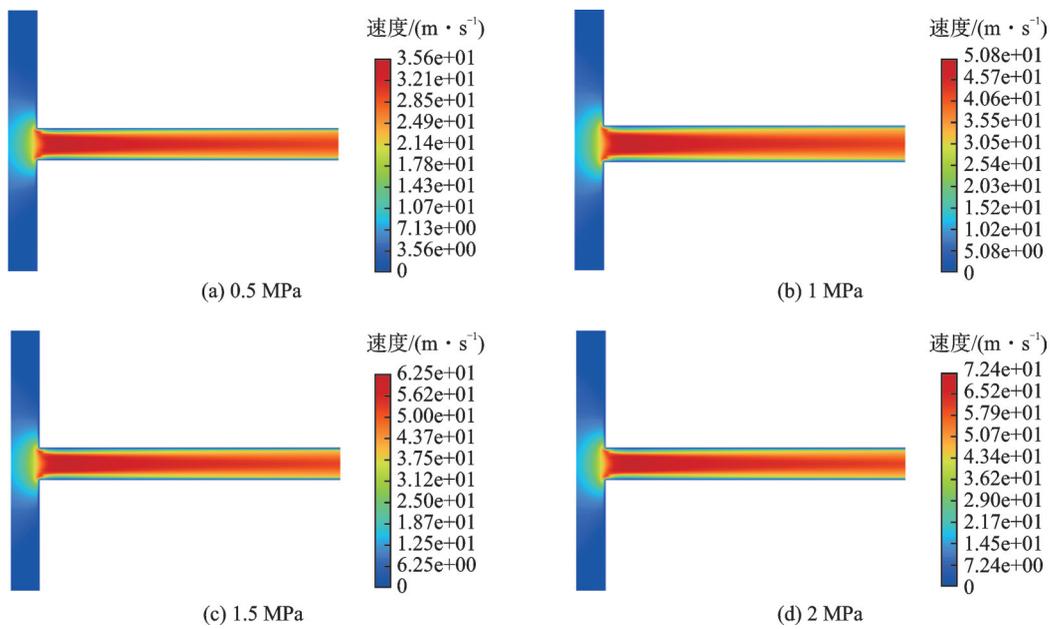


图 5 不同入口压力液相流体流速分布

Fig.5 Liquid phase fluid velocity distributions under different inlet pressures

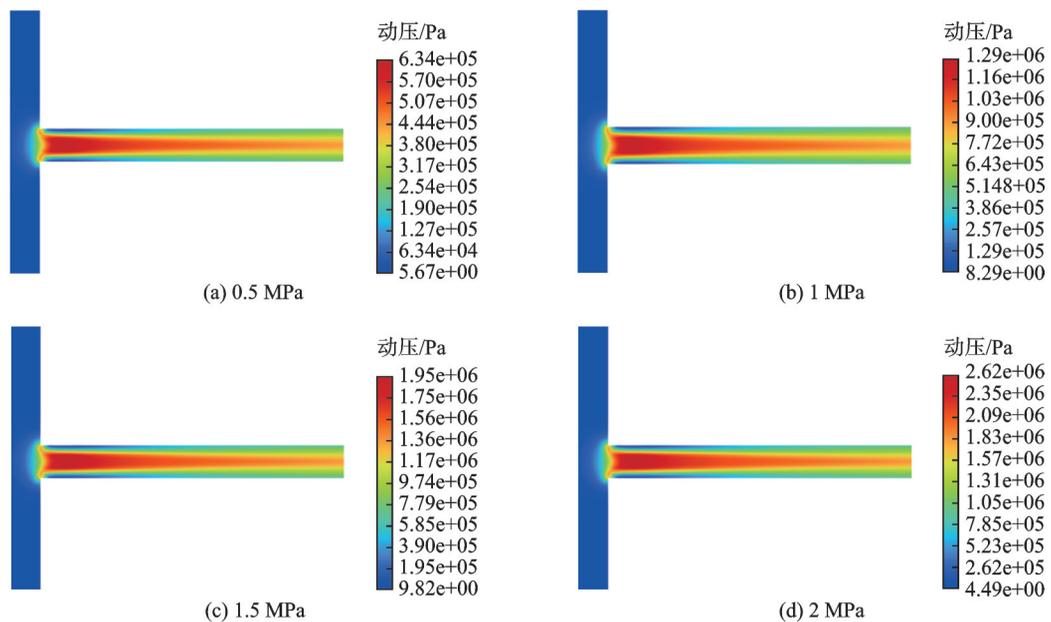


图 6 不同入口压力液相流体动压分布

Fig.6 Dynamic pressure distributions of liquid phase fluid under different inlet pressures

动压与速度平方之间存在定量关系。如图 7 所示,通过 DPM 模型中的 Particle Tracks 功能,可提取不同入口压力下固相磨粒的速度分布特征。具体而言,利用磨粒轨迹对应的速度数据,结合动压与速度的函数关系,可间接表征磨粒在流场中的冲蚀性能。

由图 7 可知,随着入口压力的增加,磨粒整体速度呈上升趋势。从壁面冲蚀效能的角度分析,不同入口压力下微细流道入口段的近壁区域磨粒浓度均相对较低,这一现象与前文所述液相流体的速度场及动压分布规律具有一致性。大部分高速磨粒主要集中在流道中心区域,被高速流体快速带

走,其对实际冲蚀效应的贡献相对有限。考虑到近壁面区域的磨粒才对微流道表面有冲蚀作用,因此需重点考察磨粒的扩散特性。值得注意的是,压力 0.5 MPa 时,磨粒轨迹在入口处呈现出优先扩散的趋势,压力 2 MPa 时磨粒轨迹扩散最慢,分析原因是:低压时湍流强度较低,磨粒受涡旋扰动较小,能够在入口段通过层流主导的平缓流动实现较规律的横向移动;同时,较厚的边界层延长了磨粒在近壁区的滞留时间,促进扩散至壁面区域的磨粒比例提升,而高压下湍流增强及边界层变薄导致磨粒被高速流体快速带走,抑制了磨粒向壁面区域扩散过程的充分性与及时性。

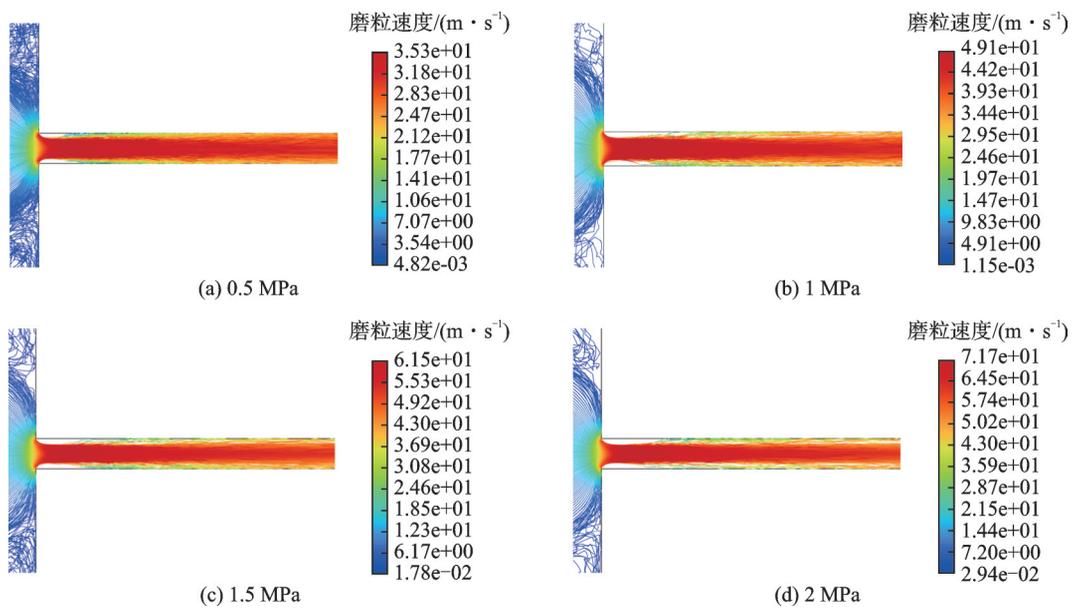


图 7 不同入口压力时固相磨粒速度分布

Fig.7 Fluid velocity distributions of solid abrasive particles under different inlet pressures

图 8 为不同入口压力下液相流体与固相磨粒最大速度及最大动压的对比分析结果。图中数据表明:固相磨粒的最大速度均低于液相流体,这是由于磨粒的加速依赖流体带动作用,其速度无法超过液相流体速度。其次,固相磨粒的最大动压均为液相流体的数倍,同时由于碳化硅的密度小于氧化

铝,磨粒速度相差不大,从而氧化铝磨粒的动压值比碳化硅磨粒大。由于固相磨粒的动压大、硬度高,可推断水基磨料的冲蚀性能本质上由固相磨粒主导。磨粒的材料去除能力还与硬度相关,后续还需通过试验验证进一步确定两种磨粒的材料去除

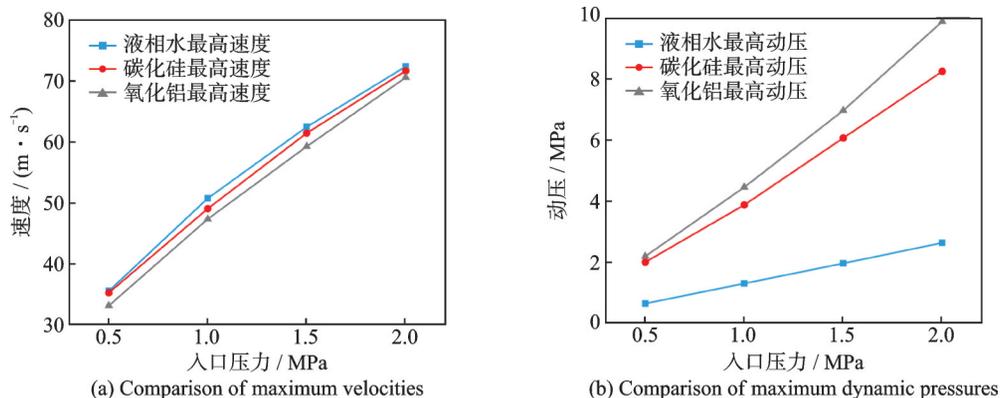


图 8 不同入口压力时液相固相参数对比

Fig.8 Comparison of liquid and solid phase parameters under different inlet pressures

能力。

通过对不同入口压力下微细流道内液相流体与固相磨粒的速度及动压分布的分析可知,水基磨料进入微细流道后,在入口段近壁区域存在固相磨粒浓度稀疏、液相流体速度与动压值偏低的现象。相比之下,中间段及出口段的近壁区域在相同参数下均表现出更高的数值。这种分布差异可能导致入口区域加工不足,进而影响微细流道水基磨粒流光整加工的均匀性。综合考虑,最终选定 0.5 MPa 入口压力开展微细流道光整加工试验。

3 水基磨粒流光整加工试验

3.1 试验装置与方法

基于水基磨粒流光整加工的流场仿真与特性分析,单向光整加工可能导致微细流道入口区域加工不足,进而影响微细流道水基磨粒流光整加工的均匀性。为提高微细流道整个区域的光整加工均匀性,本节引入双向光整加工技术作为工艺改进方案,并通过设计单向与双向光整加工对比试验,系统评估其对加工均匀性的改善效果。图 9 为自主搭建的水基磨粒流加工试验装置。图 10 展示了试验所采用的专用工装夹具及试件:试件材料

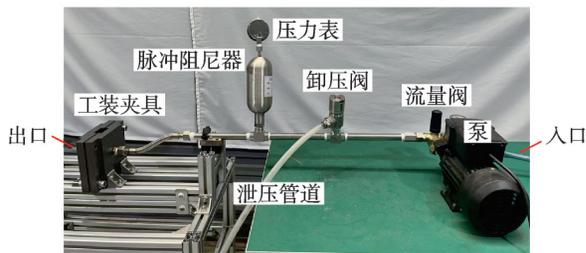


图 9 水基磨粒流加工试验装置

Fig.9 Water-based abrasive flow machining test setup

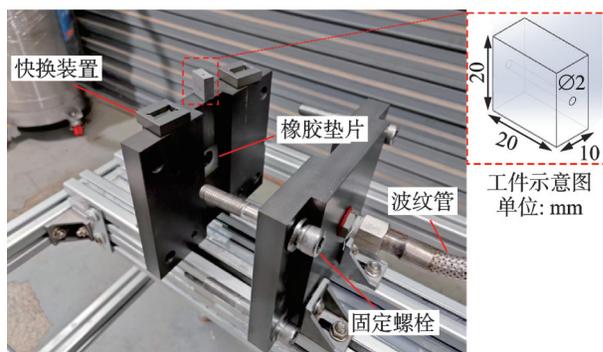


图 10 工装夹具内部示意图

Fig.10 Internal schematic diagram of the workholding fixture

为 AlSi10Mg,采用选择性激光熔融工艺实现增材制造整体成形,其几何参数为 20 mm×10 mm×20 mm,中心流道直径为 2 mm,试件加工前未进行

任何表面预处理,以直接评估水基磨粒流光整技术对原始打印态表面的改善效果。

为系统探究加工时间、磨粒种类及加工方式对微细流道内壁表面质量的影响,设计单因素试验,试验参数如表 2 所示。具体参数设置如下:入口压力设定为基于仿真优化结果确定的 0.5 MPa;鉴于磨粒在液相介质中的分散悬浮特性不仅关系到磨粒动能的均匀传递效率,更会影响材料表面去除的均匀性,基于水基磨料分散悬浮性能测试,碳化硅与氧化铝磨粒均采用 20 μm 粒径;基于前期大量预实验结果,发现当选择 2 min 为递增步长时,相邻节点表面质量差异不显著且试验效率较低,而选择 10 min 为递增步长时可能遗漏关键工艺转折点,最终确定加工时间按递增 5 min 设置 5 组,首次作为入口的孔被定义为入口。两种磨粒的物理特性对比如表 3 所示。

表 2 单因素试验参数

Table 2 Single-factor experimental parameters

试验参数	规格
入口压力/MPa	0.5
磨粒种类	SiC, Al ₂ O ₃
粒径大小/μm	20
单向光整时间/min	5、10、15、20、25
双向光整时间/min	5、10、15、20、25

表 3 SiC 和 Al₂O₃磨粒的物理特性

Table 3 Physical properties of SiC and Al₂O₃ abrasives

磨粒种类	密度/(kg·m ⁻³)	莫氏硬度	维氏硬度/GPa
SiC	3 200	9.2~9.5	28~34
Al ₂ O ₃	3 950	9	15~18

试验完成后,从表面粗糙度、扩孔量及表面形貌 3 方面评估微细流道光整加工效果。具体方法为:采用慢走丝线切割机床沿流道轴向对半切割工件以获取内壁样本,使用白光干涉仪测量流道内壁表面粗糙度,通过体式显微镜测定入口与出口直径变化量作为扩孔量。测量入口和出口直径变化量时,在入口和出口各取 3 个位置,每个位置相邻 2 mm,分别计算 3 个位置测量值的平均值作为扩孔量数值,具体测量示意图如 11(a)所示;由于流道表面粗糙度的不均匀性,将流道划分为入口段、中间段及出口段 3 个区域,每个区域选取 3 个测量点,每个点进行 3 次独立测量以获取 3 组数据,并基于 3 组数据计算均值与标准差用于绘制误差棒,表面粗糙度测量位置示意图如图 11(b)所示。

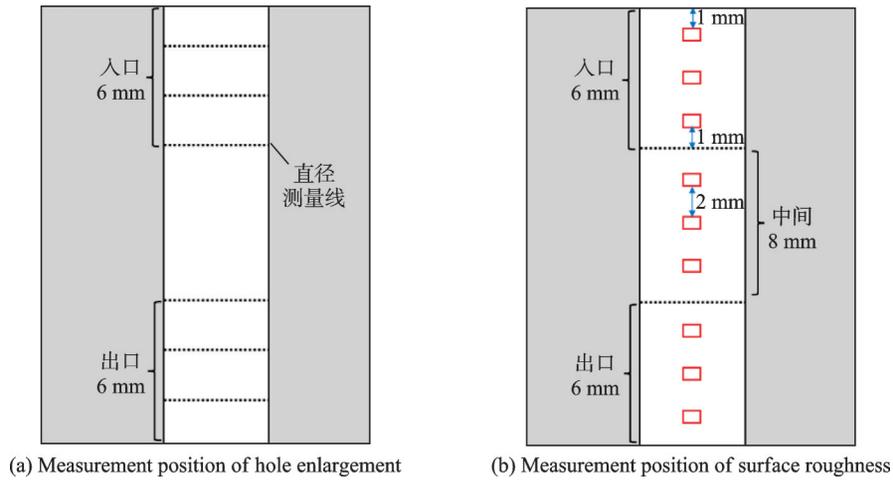


图 11 不同区域扩孔量及表面粗糙度测量示意图

Fig.11 Schematic diagrams of hole expansion and surface roughness ratio measurement in different regions

3.2 试验结果与分析

不同磨料单向/双向光整加工后流道出入口扩孔量对比如图 12 所示。由图 12(a)和(b)可知,随着单向光整加工时间增加,流道出入口扩孔量呈现差异性增长趋势,且出口扩孔量始终高于入口,这种加工现象进一步验证了仿真分析中关于入口近壁区域动压和磨粒浓度低于出口区域的结论。加工初始阶段(0~5 min),碳化硅与氧化铝磨料体系的出口扩孔量分别达到 80 和 70 μm ;随后在 5~10 min 内,两者出口扩孔量均增加约 40 μm ;20~25 min

时,碳化硅体系增加 20 μm ,氧化铝体系增加 30 μm 。数据表明,无论采用碳化硅磨料还是氧化铝磨料,出入口扩孔量在最初 5 min 内的增幅均达到峰值,随后增量逐渐趋于平缓,这是因为增材制造材料表面存在大量微观缺陷与应力集中,磨料在初始阶段优先去除这些薄弱区域,导致表层材料快速去除,随着表面形貌逐步趋于均匀化,材料去除速率自然降低。使用碳化硅磨料时出入口扩孔量均大于氧化铝,分析原因是在相同参数下碳化硅硬度大于氧化铝磨粒,材料去除能力更强。

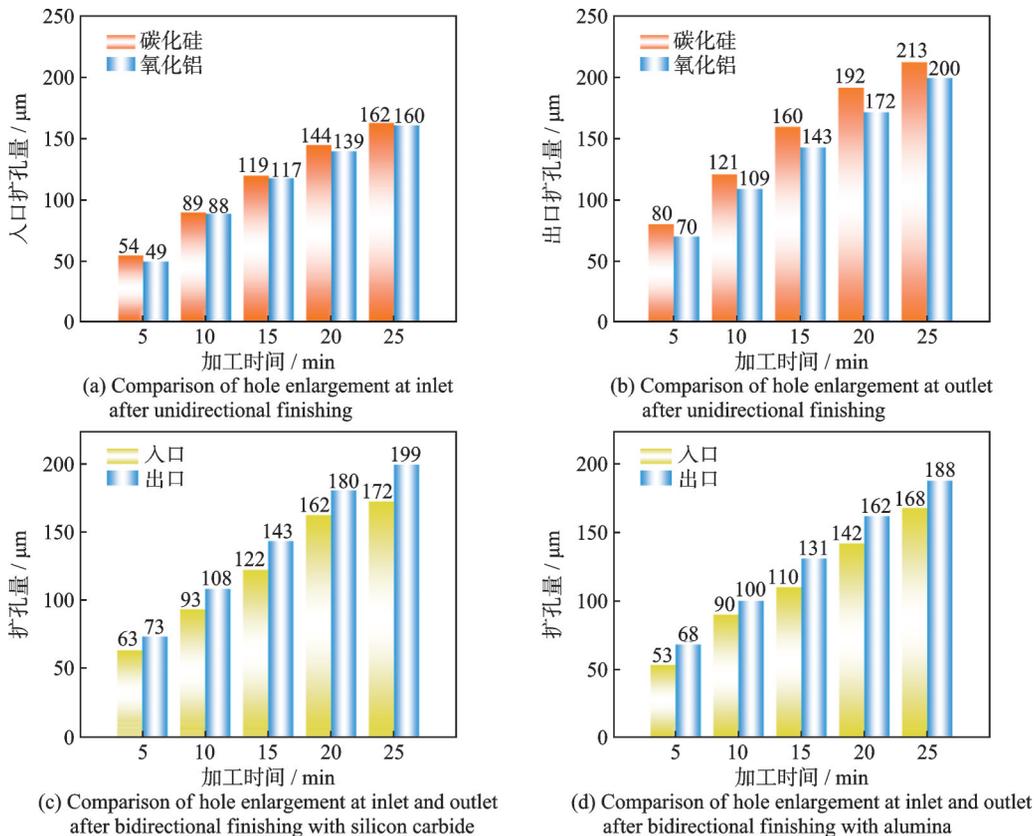


图 12 不同磨料单向/双向光整加工后流道出入口扩孔量对比

Fig.12 Comparisons of inlet and outlet hole enlargement after unidirectional and bidirectional finishing with different abrasives

图 12(c)和(d)展示了不同磨料双向光整加工模式下出入口扩孔量的对比结果。数据显示,无论采用碳化硅磨料还是氧化铝磨料,双向加工均可显著降低出入口扩孔量差值。单向加工 25 min 时,碳化硅磨料和氧化铝磨料对应的出入口扩孔量差值分别达到 51 和 40 μm ;双向加工 25 min 时,两者对应的出入口扩孔量差值分别为 27 和 20 μm 。然而,尽管出入口位置在双向加工中发生对调,实际测量结果并未呈现理论预期的对称性(即入口与出口扩孔量完全一致),而是出口扩孔量始终高于入口扩孔量。分析原因是首次加工导致流道出口尺寸大于入口。对流道进行反向加工时,这种几何形状的变化改变了流体的动力学特性,从而引起材料去除效率在正反向加工中出现差异。

使用白光干涉仪测量加工后微细流道表面粗糙度数据如图 13 所示。由图 13(a)和(c)可知:单

向加工模式下,随着加工时间增加,流道出入口以及中间区域的表面粗糙度变化存在一定的差异,在相同的加工时间内,出口区域的表面粗糙度低于其他两个区域,这说明出口区域的光整效果最优,其次是中间区域,入口区域的光整效果最差,这种加工效果与前文仿真揭示的流体动压分布差异正好对应。使用碳化硅水基磨料单向抛光 25 min 后,流道入口区域表面粗糙度从原始的 10.929 μm 降至 4.549 μm ,中间区域降至 4.159 μm ,出口区域则降低至 3.531 μm ;出口以及中间区域在初始 5 min 内粗糙度下降速率显著,随后逐渐减缓,15 min 后粗糙度值趋于稳定,分析原因是加工初期表面存在大量易去除的层间台阶、球化等缺陷,导致粗糙度快速下降,随着表面逐渐平滑,剩余微小缺陷的去除效率降低,从而形成粗糙度降低速率的显著差异。

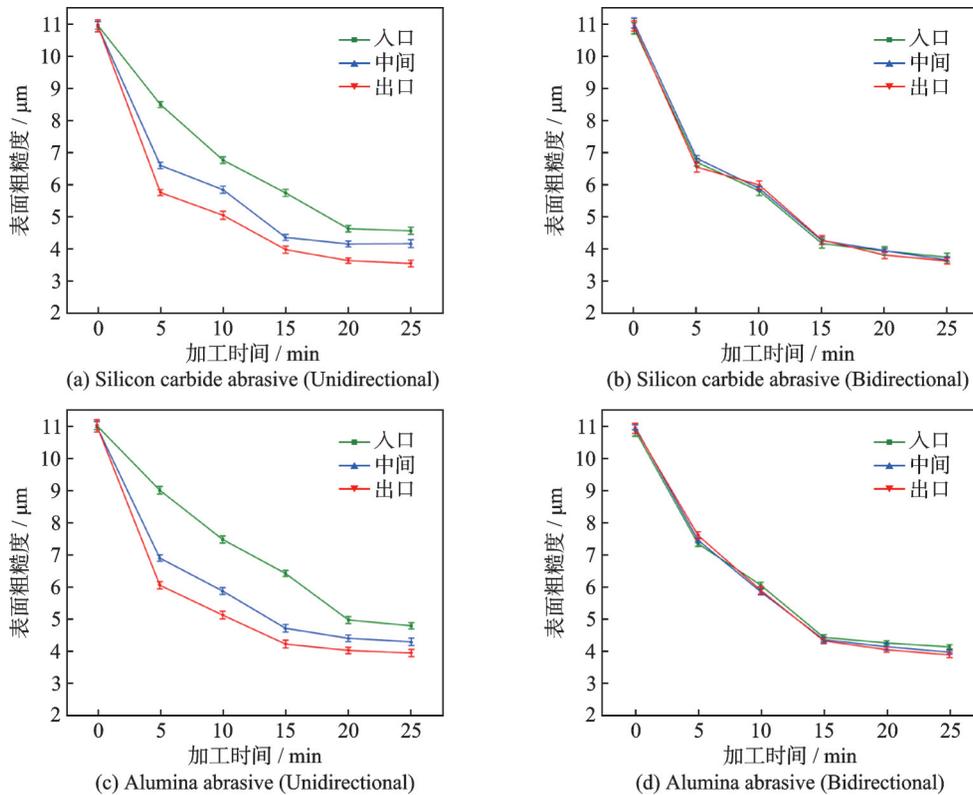


图 13 不同磨料单向/双向光整加工后流道出入口表面粗糙度对比

Fig.13 Surface roughness comparisons at inlet and outlet after unidirectional and bidirectional finishing with different abrasives

由图 13(b)和(d)数据表明,双向光整加工模式可显著缩小不同区域之间的抛光效果差异。采用碳化硅磨料抛光 25 min 后,流道出入口以及中间区域粗糙度值分别为 3.612、3.726 和 3.639 μm ,采用氧化铝磨料抛光 25 min 后,流道出入口以及中间区域粗糙度值分别为 3.876、4.127 和 3.963 μm 。通过对比可知碳化硅磨料抛光性能更优,分析原因在于增材制造流道表面粗糙度较高,碳化硅磨粒硬度高于氧化铝磨粒,因此对缺陷的去除效率更显著。

图 14 展示了微细流道不同区域的原始表面形貌,其表面广泛分布着微裂纹、球化粉末堆积形成的凹坑缺陷,以及由熔融不充分导致的孔隙结构。图 15 为使用碳化硅磨料单向抛光微细流道后不同区域的表面形貌变化图,由图可知,随着加工时间的增长,出入口以及中间区域的表面形貌呈现逐渐平整的趋势。图 15(a)表明抛光 5 min 后入口区域表面微裂纹得到一定量去除,球化粉末堆积形成的凹坑数量,抛光 10 min 后,微裂纹进一步消除,加

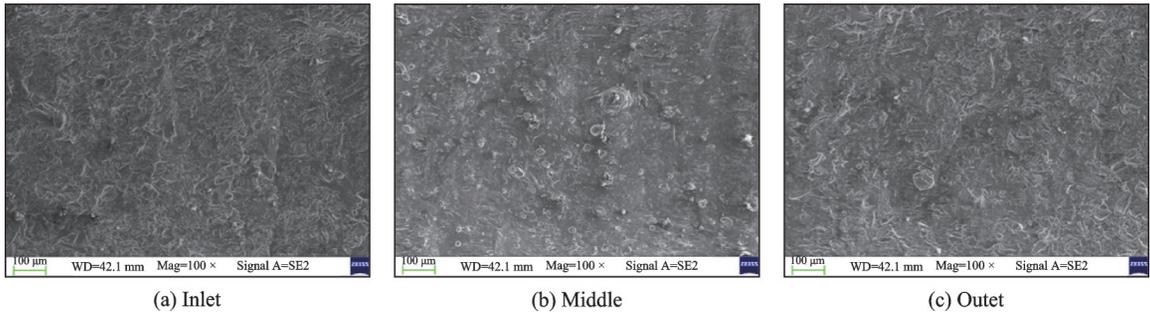


图 14 微细流道不同区域的原始表面形貌

Fig.14 Original surface morphologies at different regions of the micro-channels

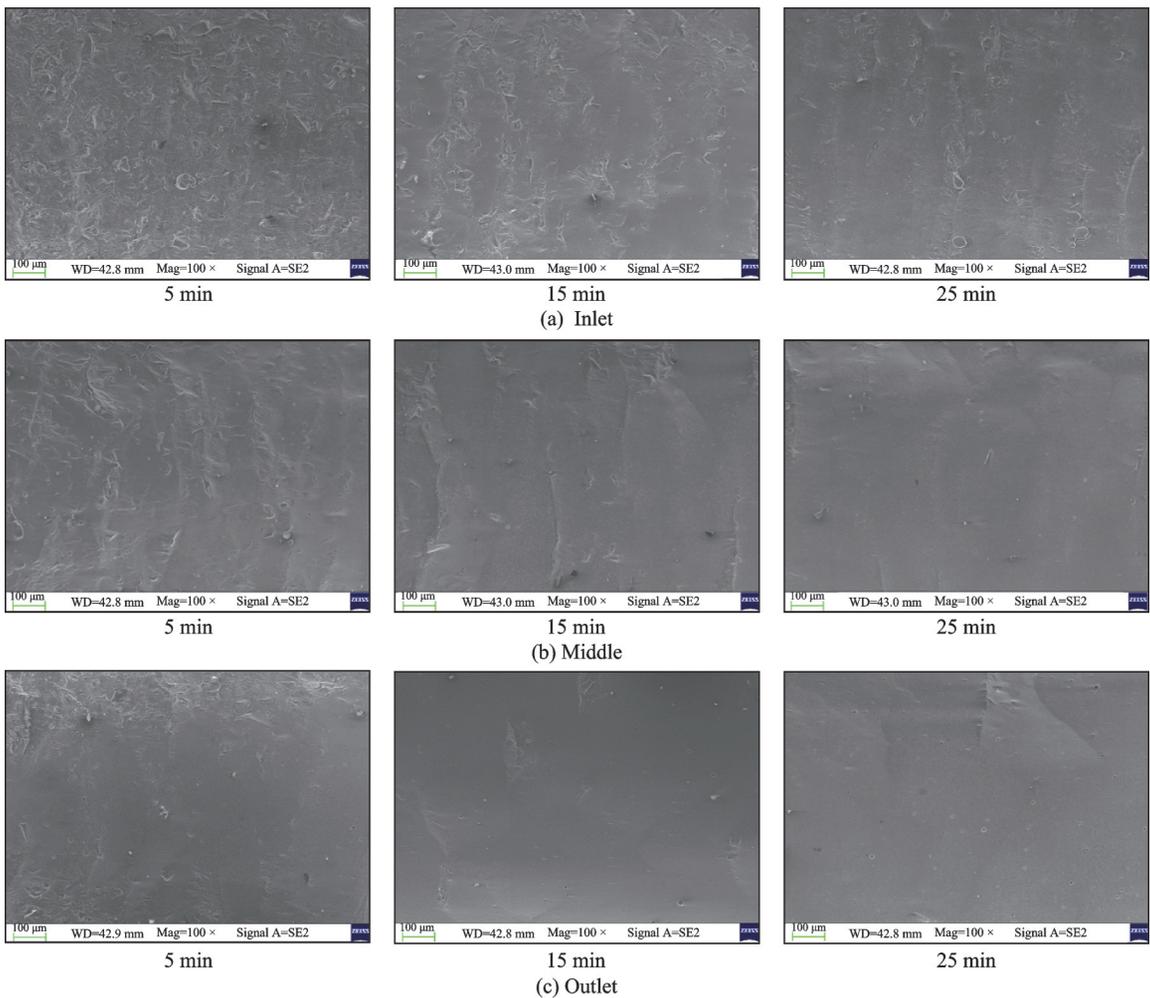


图 15 碳化硅磨料单向加工不同时间不同区域表面形貌

Fig.15 Surface morphologies at different regions after unidirectional machining with SiC abrasive (at various machining times)

工起伏痕迹逐渐显现,抛光 25 min 后,表面仅残留少量微裂纹、凹坑及孔隙。中间区域在相同加工时间内表现出更优异的平整度,表面缺陷密度低于入口区域。15(c)为出口区域的表面形貌图,其抛光效果优于入口以及中间区域,在初始 5 min 内微裂纹和凹坑缺陷即被大量去除,抛光 15 min 后已基本消除微裂纹、凹坑和孔隙缺陷,仅残留少量加工起伏痕迹,抛光 25 min 后流道表面呈现高度平整状态,看不到明显的缺陷残留。试验结果表明,微细流道出入口及中间区域的材料去除主要集中于

加工初始的 5 min,该阶段材料去除量最大且表面形貌变化最为显著;其中出口区域的抛光效果相较于入口及中间区域更优,此加工特征与前述流场仿真揭示的流体动压分布差异相吻合。图 16 展示的是氧化铝磨料单向抛光形貌变化图,其形貌演变趋势与碳化硅磨料相似,出口区域抛光效果仍优于入口以及中间区域,且在相同抛光时间内,碳化硅磨料的抛光性能优于氧化铝磨料。

图 17 为双向光整加工 25 min 后微细流道不同区域表面形貌图。图 17(a)对应碳化硅磨料,17

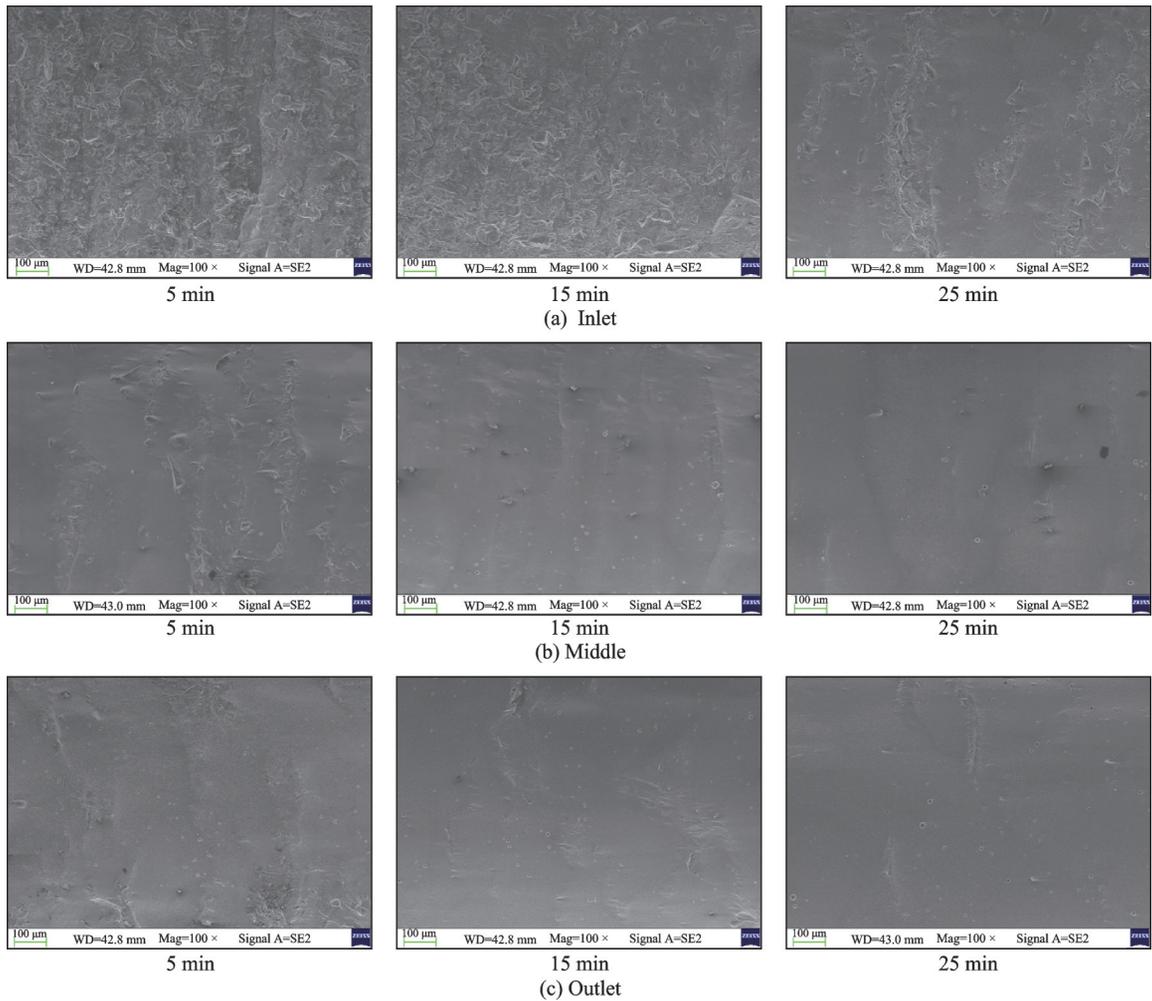


图 16 氧化铝磨料单向加工不同时间不同区域表面形貌

Fig.16 Surface morphologies at different regions after unidirectional machining with Al_2O_3 abrasive (at various machining times)

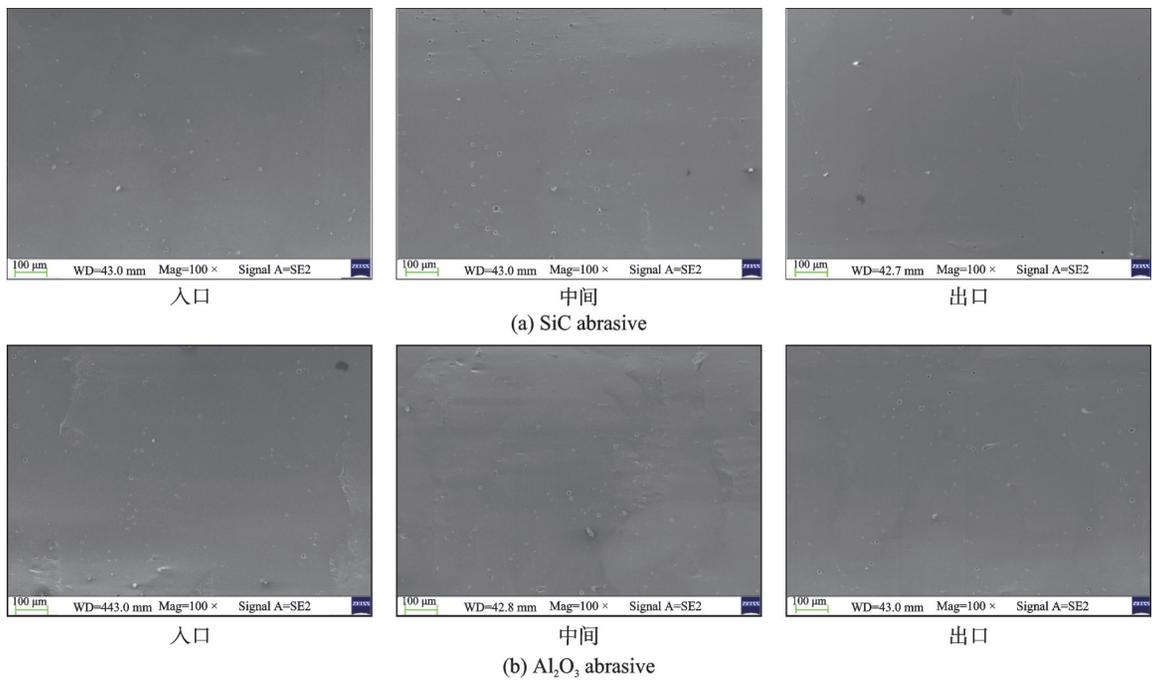


图 17 不同磨料双向光整加工模式下流道不同区域表面形貌

Fig.17 Surface morphologies at different regions of the micro-channel under bidirectional finishing with various abrasives

(b)对应氧化铝磨料。如图 17(a)所示,经 25 min 抛光后,流道各区域表面均无明显缺陷残留,且具

有较高的平整度。相比之下,采用氧化铝磨料抛光的表面(图 17(b))则残留部分流体加工起伏痕迹,

其抛光效果相较碳化硅磨料略显不足,但相较于原始形貌已有显著改善。加工后不同区域形貌差异较小进一步表明双向光整加工能有效改善流道各区域抛光的不均匀性。

双向光整加工改善流道光整不均匀性的机理在于:正向加工时入口区域高速磨粒集中于流道中心并被流体快速带走,对冲蚀贡献有限;随着流动深入,部分磨粒扩散至中、出口近壁区域,在壁面湍流作用下摩擦阻力增强,促使磨粒以多角度高频冲击表面,通过剪切、划擦及犁耕等作用有效去除缺陷,导致这些区域光整效果优于入口。反向加工时(出入口对调),因流道为直线,流场规律及磨粒运动轨迹无显著改变,中、出口近壁区域磨粒浓度仍较高,因此会产生类似的区域光整效果差异。然而,由于出入口位置互换,反向加工形成的效果差异在空间分布上与正向加工差异形成互补。

4 结 论

本文针对增材制件内腔微细流道表面质量差的问题,开展水基磨粒流加工的流场仿真与试验验证研究。首先阐述了水基磨粒流的材料去除机理及加工系统构成;随后建立了微细流道流场仿真模型,分析了不同入口压力下液相流体与固相颗粒的运动特性;最后,通过选用不同磨料并采用单向与双向加工模式进行对比试验。基于上述研究,得到以下结论:

(1) 仿真结果表明,微细流道入口近壁区域的流体速度、动压及固相磨粒浓度均低于出口以及中间区域,致使入口区域的材料去除效率低于出口以及中间区域,加工效果较差。仅调节入口压力虽可改变局部区域的参数值,但无法有效消除流道内整体分布差异,不同区域间的加工不均匀性依然显著。单向加工模式下的试验结果与上述仿真结果一致。

(2) 随着加工时间的延长,微细流道不同区域的材料去除量逐渐增加,表面粗糙度逐渐降低。相较于单向加工,双向加工模式可有效改善流道各区域的抛光不均匀性。

(3) 在相同工艺参数条件下,相较于氧化铝磨料,采用碳化硅磨料进行微细流道加工可获得更低的表面粗糙度和更均匀的表面形貌。

液压集成阀块中的微细流道除直通外,还包含多种曲率的弯曲通道,且尺寸各异。本研究以长 20 mm、直径 2 mm 的微细直通为对象,采用水基磨粒流工艺探究其加工特性。针对该规格的研究成果虽无法直接推广至其他尺寸或复杂形状的流

道,但关键工艺参数的优化方向与作用规律对其他规格微细流道的加工仍具有重要参考价值。

水基磨粒流工艺适用于航空发动机燃油喷嘴、航空氢滑油散热器复杂流道、医疗器械微流道等精密部件表面的光整加工,但实际应用面临两大挑战:一是对细长流道光整均匀性控制难度较高;二是需精准调控磨粒冲蚀动能以适配材料属性——加工高硬度材料需提升动能,而软质材料则需降低动能以防过加工。因此,后续研究将在直通工艺基础上,进一步探索曲率更大的弯曲流道以及孔径更小、长径比更大的微细流道的加工控制方法。

参考文献:

- [1] 顾钰颖. 面向增材制造的轻量化液压集成块三维随动排布优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
GU Yuying. 3D follow-up configuration design of lightweight hydraulic manifold blocks based on additive manufacturing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [2] 李子阳. 基于增材制造的液压集成阀块优化设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
LI Ziyang. Optimized design of hydraulic integrated valve blocks based on additive manufacturing[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.
- [3] 杨阳, 陈小虎, 周雷, 等. 增材制造成形液压流道沿程损失研究[J]. 液压与气动, 2020, 44(7): 127-131.
YANG Yang, CHEN Xiaohu, ZHOU Lei, et al. Study of friction loss in additive manufactured fluid passages[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, 44(7): 127-131.
- [4] 刘静怡, 李文辉, 李秀红, 等. 航空零部件的金属增材制造光整加工技术研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(12): 20-41.
LIU Jingyi, LI Wenhui, LI Xiuhong, et al. Research progress of finishing technology for aviation parts built by metal additive manufacturing[J]. Surface Technology, 2023, 52(12): 20-41.
- [5] 刘彦磊, 孙玉利, 杨范轩, 等. 三通阀门内腔磨粒流光整加工流场仿真分析与试验验证[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(1): 130-138.
LIU Yanlei, SUN Yuli, YANG Fanxuan, et al. Simulation analysis and experimental verification of abrasive particle feeding flow field in the inner cavity of a three-way valve[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(1): 130-138.
- [6] 杨范轩, 孙玉利, 马杰, 等. 航空用不锈钢磨粒流光整加工表面完整性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 452-460.

- YANG Fanxuan, SUN Yuli, MA Jie, et al. Study on surface integrity of aviation stainless steel in abrasive flow machining[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 452-460.
- [7] 袁智敏. 面向钛合金复杂曲面的软性磨粒流加工方法[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
- YUAN Zhimin. Study on the softness abrasive flow machining oriented to titanium alloy complex surface [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018.
- [8] 陈法宇. 增材制造异形波导管球形内腔磁力研磨技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- CHEN Fayu. Study on magnetic grinding technology of spherical cavity of special-shaped waveguide made by adding materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.
- [9] 王志, 董世运, 闫世兴, 等. 增材制造金属零件超快激光抛光技术研究进展[J]. 表面技术, 2025, 54(7): 19-33.
- WANG Zhi, DONG Shiyun, YAN Shixing, et al. Advances in the research of ultrafast laser polishing technologies for additive manufacturing metal parts [J]. Surface Technology, 2025, 54(7): 19-33.
- [10] 王炳坤, 郝娟, 吴冬, 等. 高温合金气膜孔的高速水基磨粒两相流光整研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(10): 1-8.
- WANG Bingkun, HAO Juan, WU Dong, et al. Study on high-speed water-based abrasive two-phase flow finishing of high-temperature alloy gas film holes [J]. Plating & Finishing, 2024, 46(10): 1-8.
- [11] 何锡威. 基于磨粒空化射流的增材制造内流道抛光技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- HE Xiwei. Research on polishing technology of additively manufactured internal channels based on hydrodynamic cavitation abrasive finishing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [12] 刘鑫. 高温合金微小孔电火花与水基磨粒流组合加工方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
- LIU Xin. Research on drilling micro and small holes on super-alloy using combined process of electric discharge and water abrasive flow[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [13] LIU Z, XIAO L J, LIU X, et al. Abrasive water flow polishing of superalloy microholes drilled by electrical discharge machining[J]. Precision Engineering, 2023, 84: 110-118.
- [14] 潘峥正, 万庆丰, 雷玉勇, 等. 基于后混合式磨料水射流磨料颗粒运动研究[J]. 机床与液压, 2014, 42(9): 109-112.
- PAN Zhengzheng, WAN Qingfeng, LEI Yuyong, et al. Research on motion of abrasive in post-mixed abrasive water jet[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(9): 109-112.
- [15] 夏三星. 不锈钢微创手术导管超声复合磨料水射流去毛刺技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- XIA Sanxing. Research on ultrasonic combined abrasive water jet deburring technology of stainless steel catheter in minimally invasive surgery[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [16] GU Q M, ZHANG Z Y, ZHOU H X, et al. A novel approach of jet polishing for interior surface of small-grooved components using three developed setups[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6(2): 025101.
- [17] MANJHI S K, SEKAR P, BONTHA S, et al. Additive manufacturing of magnesium alloys: Characterization and post-processing[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2024, 7(1): 184-213.
- [18] 王嘉琦. 固-液两相磨粒流中对于颗粒碰撞结构化表面的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- WANG Jiaqi. Research on particles in soft abrasive flow colliding with the structural surface[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.
- [19] CARNICER V, ALCÁZAR C, ORTS M J, et al. Microfluidic rheology: A new approach to measure viscosity of ceramic suspensions at extremely high shear rates[J]. Open Ceramics, 2021, 5: 100052.

(编辑: 胥橙庭)