

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.05.018

高速水基两相流对 SLM CoCrMo 燃油喷嘴 微细复杂流道的光整研究

边娟鸽¹, 王百川², 王超¹, 张超¹, 米天健², 郝娟^{2*}

(1. 西安航空职业技术学院 航空材料工程学院, 陕西 西安 710089;

2. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 随着 SLM CoCrMo 燃油喷嘴在航空航天等领域的应用需求不断提升, 化学、电化学、磨粒流、磨料水射流等目前常见抛光方法对消除燃油喷嘴内流道表面缺陷均存在较大局限性, 因此改善 SLM CoCrMo 燃油喷嘴微细复杂内流道的表面质量是目前亟待解决的关键问题之一。本文基于高速水基磨粒两相流抛光方法, 选用碳化硅作为磨粒材料制备低黏水基抛光介质, 在不同的抛光压力条件下对 SLM 燃油喷嘴二维试样内流道进行光整处理。采用扫描电子显微镜、激光共聚焦扫描显微镜、流体动力特性检测平台、洛氏硬度计等检测手段对比分析抛光前后内流道表面微观形貌、表面粗糙度、尺寸精度、流量及洛氏硬度。结果表明, 高速水基磨粒两相流可显著去除 SLM 燃油喷嘴内流道表面的黏粉、台阶等缺陷, 口径尺寸精度均在合理范围内。随着抛光压力由 2 MPa 增大至 3.5 MPa, 流道壁面由部分去除到基本完全去除, 最终转变为明显子弹流状的过磨痕迹, 流道表面粗糙度、洛氏硬度均呈现先减小后增大的变化趋势。当抛光压力为 2.5 MPa 时, 抛光后的流道表面粗糙度达到最小值 1.415 μm (原始 9.090 μm), 流道口径扩大尺寸控制精度较好, 去除速率由 0.0127 mm/min 增大至 0.0143 mm/min, 喷嘴流量由原始 12.47 kg/h 增加至 21.47 kg/h, 流道表面洛氏硬度由原始 27.4 HRC 提升至 32.6 HRC, 内流道表面光整效果达到最佳。

关键词: 高速水基磨粒两相流; 抛光压力; 表面粗糙度; 去除速率

中图分类号: TG175.3

文献标识码: A

Study on the finishing of microfabricated complex flowpath in SLM CoCrMo fuel nozzles by high-speed water-based two-phase flow

Bian Juange¹, Wang Baichuan², Wang Chao¹, Zang Chao¹, Mi Tianjian², Hao Juan^{2*}

(1. School of Materials Science and Technology, Xi'an Aviation Vocational and Technical College, Xi'an 710089, China; 2. School of Materials Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: With the increasing demand for SLM CoCrMo fuel nozzles in aerospace and other fields,

收稿日期: 2025-01-27 修回日期: 2025-03-21

作者简介: 边娟鸽(1979—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为可编程控制器、组态监控、液压与气动技术, email: 603105301@qq.com

通信作者: 郝娟, email: haojuan19901207@163.com

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目(23JP076); 国家自然科学基金项目(52401060); 西安市科技计划项目(23GXFW0055); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0525)

引用信息: 边娟鸽, 王百川, 王超, 等. 高速水基两相流对 SLM CoCrMo 燃油喷嘴微细复杂流道的光整研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(5): 120-127.

Bian Juange, Wang Baichuan, Wang Chao, et al. Study on the finishing of microfabricated complex flowpath in SLM CoCrMo fuel nozzles by high-speed water-based two-phase flow[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(5): 120-127.

common polishing methods such as chemistry, electrochemistry, abrasive grain flow, and abrasive water jet have significant limitations in eliminating surface defects in the internal flowpath of fuel nozzles. Therefore, improving the surface quality of the fine and complex internal flowpath of SLM CoCrMo fuel nozzles is one of the key issues that urgently need to be addressed. In this paper, based on the high-speed water-based abrasive two-phase flow polishing method, silicon carbide is used as the abrasive material to prepare low-viscosity water-based polishing medium, and the two-dimensional specimen of SLM fuel nozzle internal flowpath is polished under different polishing pressure conditions, and scanning electron microscope, laser confocal scanning microscope, fluid dynamic characteristic detection platform, Rockwell hardness tester and other testing means are used to compare and analyze the surface micro-morphology, surface roughness, dimensional accuracy, flow rate and Rockwell hardness of the inner channel surface before and after polishing. The experimental results show that the two-phase flow of high-speed water-based abrasive particles can significantly remove the viscous powder, steps and other defects on the surface of the internal flowpath of the SLM fuel nozzle, and the dimensional accuracy of the caliber is within a reasonable range. As the polishing pressure increases from 2 MPa to 3.5 MPa, the wall surface of the flowpath changes from partial removal to almost complete removal, and finally transforms into an obvious bullet flow-like overgrinding traces. The surface roughness and Rockwell hardness of the flowpath show a trend of decreasing first and then increasing. When the polishing pressure is 2.5 MPa, the surface roughness of the polished flowpath reaches a minimum value of 1.415 μm (original 9.090 μm), the flowpath caliber expansion size control accuracy is better, the removal rate changes from 0.012 7 mm/min to 0.014 3 mm/min, the nozzle flow rate changes from the original 12.47 kg/h to 21.47 kg/h, the surface of the flowpath Rockwell hardness increases from 27.4 HRC to 32.6 HRC. The surface finishing effect of the inner channel reaches the best.

Keywords: high-speed water-based abrasive two-phase flow; polishing pressure; surface roughness; removal rate

CoCrMo燃油喷嘴是一种具有微细复杂内流道(口径 $<3\text{ mm}$, 长径比 >50)的航空发动机关键零部件^[1]。在航空发动机中, 燃油在一定压力作用下被注入燃油喷嘴中, 经过流道后以雾化形式喷射, 并与压缩空气按照一定比例混合后燃烧, 形成发动机工作能量源。燃油喷嘴微细复杂内流道的表面粗糙度对燃油的流动特性与喷嘴喷雾性能具有显著影响^[2], 从而严重影响航空发动机的使用寿命与安全稳定性^[3]。

随着CoCrMo燃油喷嘴在航空航天领域中的应用需求不断提高, 其设计和制造技术也在不断进步。激光选区熔化(Selective laser melting, 简称SLM)是通过选用激光作为能量源, 按照三维CAD切片模型中规划好的路径在金属粉末床层进行逐层扫描, 将扫描路径上的金属粉末熔化、凝固从而达到冶金结合的效果, 逐层累积出三维实体^[4]。因具有精度高和生产效率高的优势, 从而成为CoCrMo燃油喷嘴最具应用前景的制造技术。然而, SLM增材制造技术在成形零件过程中因存在温度

梯度和逐层成形等自身工艺特点, 导致零件内流道表面存在半烧结或粘结的粉末颗粒、表面“台阶”和“粗化”效应以及表面缺陷裂纹层^[5], 严重影响其使用安全性。为了消除SLM CoCrMo燃油喷嘴的表面缺陷, 研究者们对成形工艺进行了不断尝试与优化, 但研究表明其对于流道内壁的表面缺陷控制有限且始终无法完全规避, 因此需要配合表面光整处理才能满足其使用性能要求^[6-9]。

目前常见的内流道光整方法有化学、电化学、磨粒流、磨料水射流、磁力及磁流变等。国内外已有专利和文献表明, 以上方法对于口径小于 3 mm 、长径比大于 50 的微细复杂内流道光整均存在较大的局限性^[10-11]。对于化学抛光, 因微细复杂流道内可容纳的腐蚀溶液较少, 且局部易出现反应气泡塞积^[12-13], 从而导致其抛光效率极低甚至无法抛光; 电化学抛光因难以在狭小流道内放置仿形电极而无法抛光微细复杂内流道^[14-15]; 磨粒流多采用含有坚硬磨粒的半流动粘弹性抛光介质对流道进行挤压研磨从而实现抛光, 该高黏度的抛光介质很难通

过微细、大长径比的复杂流道实现均匀加工，且易造成流道端口严重变形^[16-17]；磨料水射流利用施压喷嘴喷出带有磨粒的水射流实现冲蚀去除，水射流喷嘴与零件表面保持较短的距离，因而适合深度较浅的盲孔和通孔内表面抛光^[18-21]；磁力抛光及磁流变抛光等受外加能场方式的约束，适用于形状简单的管形零件内表面或近直线型流道抛光^[22-24]，难以应对呈三维空间走向的复杂内流道抛光。

高速水基磨粒两相流是本团队自主研发的一种针对微细复杂内流道结构的新型光整方法，即采用低黏度自由流动的水基（黏度 $\mu < 200$ cP）和碳化硅固体磨粒制备抛光介质，以提高其在微细、大长径比内流道中的高流动通过性，同时大幅提高设备液压推力并将推力直接施加在内流道两端，使低黏抛光介质在流道内进行高速湍流运动，如“刚体刀具”般坚硬的流体带着磨粒在流道内多角度高频切削表面，最终实现有效抛光^[25-26]。该方法属于物理抛光方法，具有对结构通过性和适用性高、加工高效、不损伤基体组织、无热影响区、抛光表面质量高等众多显著优点，是一种无粉尘、低噪音、无化学污染的绿色低碳环保技术。

因此，基于高速水基磨粒两相流新型光整方法，选用碳化硅作为磨粒材料制备低黏水基抛光介质，在不同的抛光压力条件下对SLM燃油喷嘴二维试样内流道进行光整处理，对比分析光整前后内流道表面微观形貌、表面粗糙度、尺寸精度、流量及洛氏硬度的变化规律，为SLM CoCrMo燃油喷嘴的关键光整后处理提供理论依据和实验指导。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验采用EOS M290型号激光选区熔融增材制造设备制造CoCrMo高温合金燃油喷嘴二维试样，原始材料为CoCrMo合金粉末，其粉末微观形貌如图1所示。通过对CoCrMo合金粉末进行能谱仪(EDS)的分析，可知粉末的合金的成分(如表1所示)。

表 1 CoCrMo 高温合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of CoCrMo superalloy

元素	Cr	Mo	Si	Mn	Fe	N	C	Ni	Al	Ti	W	Co
含量/(wt.%)	29.40	6.0	0.80	0.75	0.26	0.19	0.15	0.09	<0.01	<0.01	<0.01	et

1.2 实验方案

选用质量浓度为20 g/L的球形碳化硅(粒径为

图2为CoCrMo高温合金粉末基本尺寸分布，经激光粒度分析仪测得粉末 $Dv_{(50)}=4.530 \mu\text{m}$ ，表示为体积分数为50%的粒径尺寸大都为 $4.530 \mu\text{m}$ 。燃油喷嘴二维试样结构实物如图3所示，其流道口径约为2.0~2.5 mm，长径比约为100。

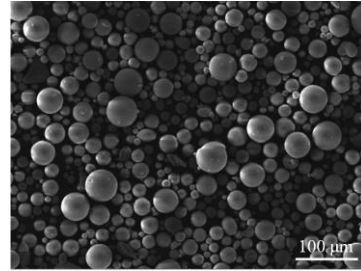


图 1 CoCrMo 高温合金粉末 SEM 图

Fig.1 SEM image of CoCrMo superalloy powder

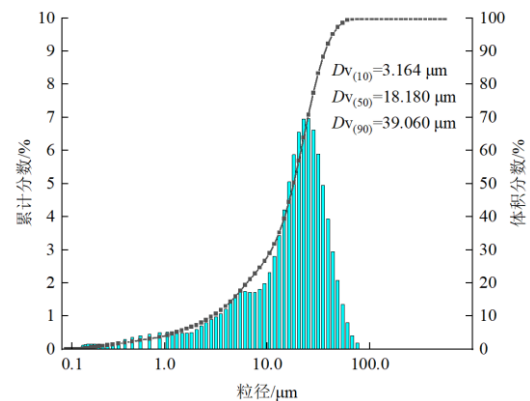


图 2 CoCrMo 高温合金粉末的基本粒度分布

Fig.2 Basic particle size distribution of CoCrMo superalloy powder



图 3 CoCrMo 高温合金燃油喷嘴二维构件实物图

Fig.3 Two dimensional component physical image of CoCrMo superalloy fuel nozzle

25 μm)作为磨粒材料，1 wt.%的聚丙烯酸盐类作为分散剂，1 wt.%的聚氧化乙烯作为增粘剂，溶剂选

用去离子水, 配制得到黏度为120 cP、密度为 2.5 g/cm^3 的低黏水基抛光介质。基于高速水基磨粒两相流整设备(如图4所示), 分别设置抛光压力为2.0、2.5、3.0和3.5 MPa制备出4个抛光样品(分别编号为样品2~样品4), 抛光时间均为90 min, 并将以上样品与原始试样(编号为样品1)进行对比。

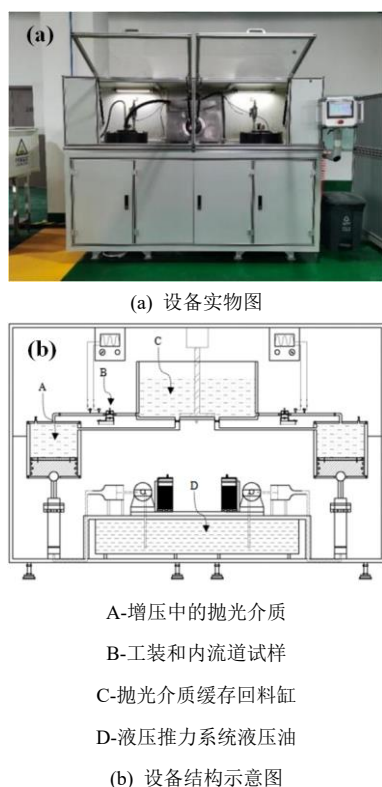


图4 高速水基磨粒两相流装置实物图与示意图

Fig.4 Physical diagram and schematic diagram of high-speed water-based abrasive two-phase flow device

具体抛光过程如下所示: 首先, 将试样装在高速水基磨粒两相流装置中, 再将抛光介质加入到料缸中设置抛光压力、抛光时间等核心参数; 其次, 启动设备电源, 增压系统推动料缸中的活塞, 将抛光介质挤压进入工件内流道的端口后进行抛光, 然后经过内流道后从工件流道出口流出; 最后, 流出的抛光介质通过导流管流回料缸中, 实现工件内流道的抛光并完成加工循环, 如此往复。抛光结束后, 将料缸中的抛光介质导出后对料缸进行清洁, 即将去离子水加入到料缸中, 开启设备用去离子水进行加工, 从内流道出口的去离子水进入排水容器并从其中排出, 最后进行超声波清洗与烘干, 完成设备清理。

1.3 表征手段

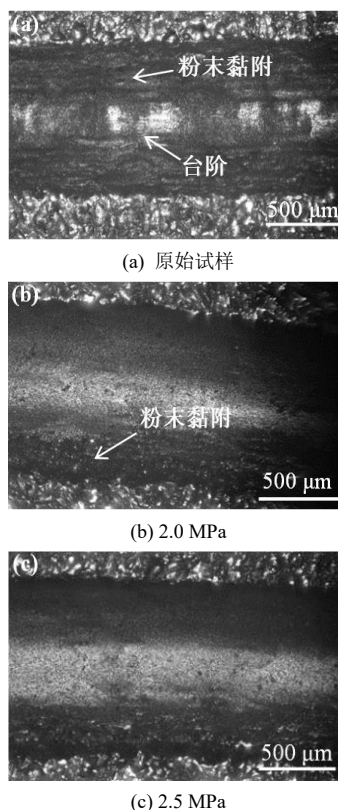
利用JSM-6700F型扫描电子显微镜(SEM)对燃

油喷嘴内流道表面形貌进行观察; 利用LEXTOL S4000型激光共聚焦显微镜对燃油喷嘴内流道的三维形貌、表面粗糙度及尺寸精度进行检测; 利用流体动力检测平台实现对流量的检测分析; 利用洛氏硬度计对燃油喷嘴内流道表面硬度进行测量。

2 实验结果与分析

2.1 内流道表面形貌分析

图5为抛光前后内流道表面的微观形貌, 经SLM制造的燃油喷嘴二维原始试样内流道表面整体较为粗糙, 受成型工艺的影响流道表面存在明显的粉末粘附、台阶等缺陷; 经抛光压力2.0 MPa条件抛光后, 流道表面整体去除效果显著, 流道底部的粉末粘附、台阶等缺陷大部分已经被去除, 但流道侧面仍存在部分粉末黏附; 经抛光压力2.5 MPa条件抛光后, 流道表面整体的粉末黏附、台阶等缺陷已基本完全去除, 流道表面整体光滑平整; 经抛光压力3.0 MPa条件抛光后, 内流道表面的粉末黏附、台阶等缺陷已完全去除, 但流道底部出现了过磨的子弹流形貌, 导致流道表面的起伏度增加; 经抛光压力3.5 MPa条件抛光后, 内流道表面出现了显著的子弹流形貌, 流道底部表面起伏度大幅度增加。因此, 当抛光压力为2.5 MPa时, 抛光效果最好, 流道表面质量最优。



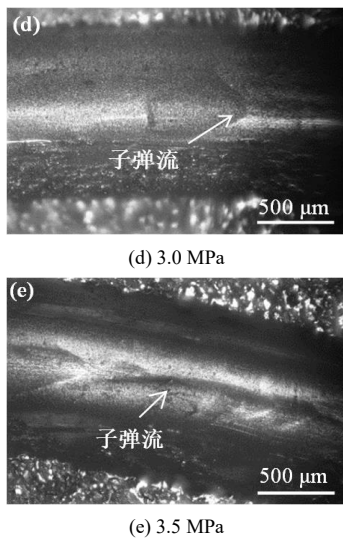


图 5 不同抛光压力下流道表面的 SEM 图

Fig.5 SEM images of the flow channel surface under different grinding and polishing pressures

2.2 内流道表面粗糙度分析

图6、图7分别为经高速水基两相流光整前后燃油喷嘴内流道的表面三维形貌和粗糙度。图6(a)为原始试样的三维形貌，内流道表面存在显著的凹凸不平形貌，其表面起伏度较大，整体较为粗糙，这是由于激光选区熔融过程中出现了粉末粘附现象，导致内流道表面粗糙度值较高，约为9.090 μm 。图6(b)为经抛光压力为2.0 MPa条件下抛光后流道表面的三维形貌，较原始试样而言，流道表面整体起伏度显著下降，但底部仍有未完全去除的缺陷，流道表面粗糙度约为2.278 μm ；图6(c)为经抛光压力为2.5 MPa条件下抛光后流道表面的三维形貌，流道表面整体光滑平整，流道表面粗糙度为1.415 μm ；图6(d)为经抛光压力为3.0 MPa条件下抛光后流道表面的三维形貌，流道底部出现凹凸不平的陷坑，整体起伏度增加，流道表面粗糙度约为2.684 μm ；图6(e)为经抛光压力为3.5 MPa条件下抛光试样的三维形貌，流道底部与侧面均出现大量的凹凸不平形貌，流道表面整体起伏度大幅增加，其表面粗糙度

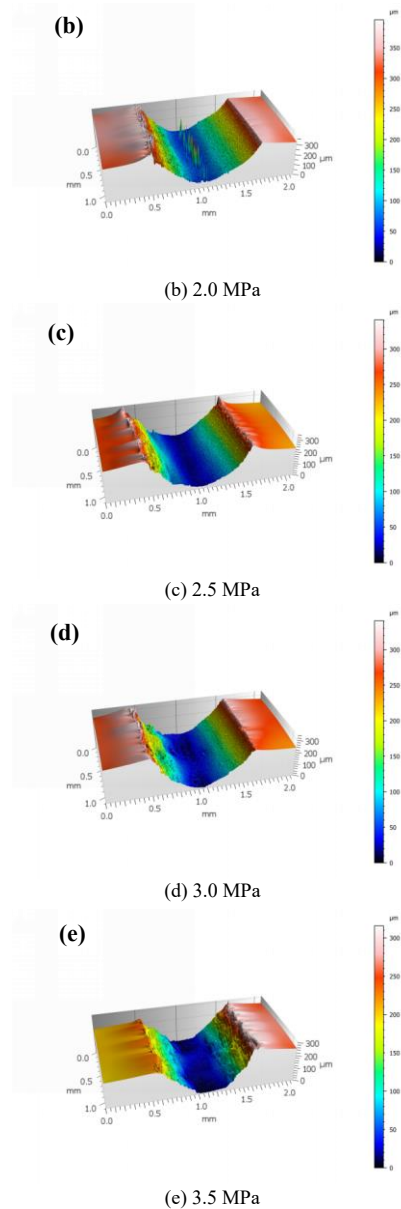
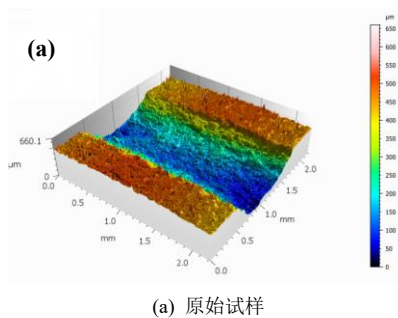


图 6 流道表面三维形貌图

Fig.6 Three dimensional morphology map of the channel surface

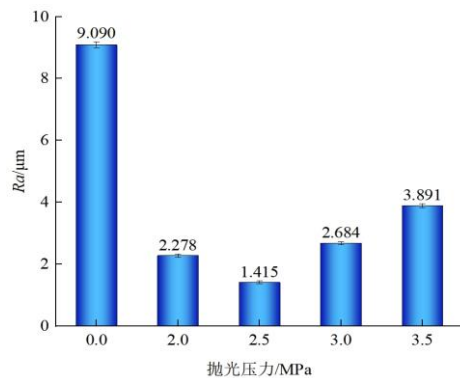


图 7 流道表面粗糙度

Fig.7 Surface roughness of the flowpath

约为 $3.891\ \mu\text{m}$ 。综上,当抛光压力为 $2.5\ \text{MPa}$ 时,内流道表面整体最为光滑平整,表面粗糙度由原始试样 $9.090\ \mu\text{m}$ 显著降低至 $1.415\ \mu\text{m}$,抛光效果最佳,这与上文内流道表面的微观形貌图结果一致。

2.3 燃油喷嘴内流道尺寸精度分析

微细复杂流道燃油喷嘴流道的端口径对实际使用过程中的燃油流量大小、流动状态和喷雾性能具有重要的影响^[27]。利用激光共聚焦显微镜对燃油喷嘴内流道口径尺寸精度进行测量,即在流道局部区域的三维形貌图中选取与流道方向相垂直的轴向截面,在图像中测得流道两侧壁面间的距离,即为流道口径。实验选取多组截面进行口径测量并求得平均值,结果如图8所示。由图8可知,原始试样的流道口径约为 $1.106\ \text{mm}$,在抛光压力分别为 2.0 、 2.5 、 3.0 和 $3.5\ \text{MPa}$ 的条件下进行抛光后,流道口径的尺寸分别变为 1.145 、 1.166 、 1.260 和 $1.291\ \text{mm}$ 。较原始试样而言,流道口径尺寸分别扩大了 3.5% 、 5.4% 、 13.9% 和 16.7% ,但均在允许的尺寸公差范围内。

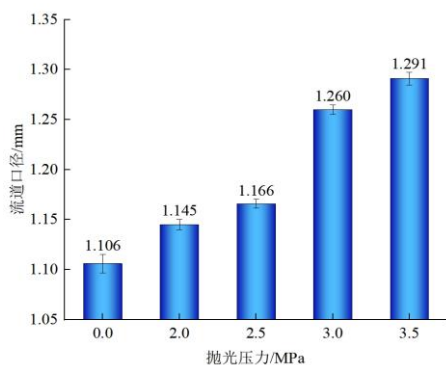


图8 流道口径尺寸

Fig.8 Size of channel diameter

在抛光工艺中,去除速率是表征去除效率的关键指标。本文采用单位时间内流道口径的去除厚度来表征去除速率,结果如图9所示。由图9可知,抛

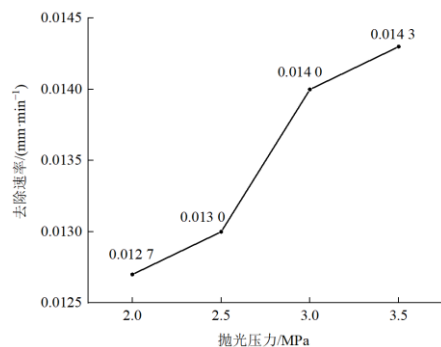


图9 流道口径去除速率

Fig.9 Removal rate of channel diameter

光压力为 2.0 、 2.5 、 3.0 和 $3.5\ \text{MPa}$ 的内流道表面去除速率分别为 0.0127 、 0.0130 、 0.0140 和 $0.0143\ \text{mm}/\text{min}$ 。SLM CoCrMo燃油喷嘴在经过高速水基磨粒两相流抛光后,去除效率明显增加,且抛光压力越大,去除效率越高。

2.4 燃油喷嘴流量分析

微细复杂内流道燃油喷嘴的流量大小是衡量燃油喷嘴综合性能好坏的重要指标,结果如图10所示。

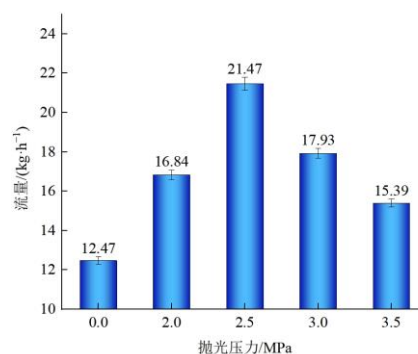


图10 燃油喷嘴流量

Fig.10 Fuel nozzle flow rate

可以看出,微细复杂内流道燃油喷嘴原始试样的流量大小约为 $12.47\ \text{kg}/\text{h}$,在抛光压力分别为 2.0 、 2.5 、 3.0 和 $3.5\ \text{MPa}$ 的条件下进行抛光后,喷嘴试样的流量分别为 16.84 、 21.47 、 17.93 和 $15.39\ \text{kg}/\text{h}$ 。该结果表明,高速水基磨粒两相流光整方法可大幅提升燃油喷嘴的流量,且越光滑的喷嘴内流道表面,流量越大。其原因是由于内流道表面存在的缺陷及凹坑会影响燃油的通过,因此降低其流体流量。

2.5 内流道表面洛氏硬度分析

燃油喷嘴内流道表面洛氏硬度如图11所示。由图可知,经SLM成型的原始试样流道表面洛氏硬度为 $27.4\ \text{HRC}$,在抛光压力分别为 2.0 、 2.5 、 3.0 和 $3.5\ \text{MPa}$ 的条件下进行抛光后,流道表面洛氏硬度分别为 30.5 、 32.6 、 28.4 和 $27.2\ \text{HRC}$,呈现出先增大后减小的变化趋势。分析其原因,当抛光压力为 2.0 和 $2.5\ \text{MPa}$ 时,光整后内流道表面的微观缺陷和裂纹被有效去除,减少了流道表面的应力集中分布,使得合金的整体硬度得到提升,其次,在光整过程中,流道表面受到高速运动抛光介质的剪切应力作用,促使位错进行增殖和运动,随着位错密度增加,位错之间的相互作用增强,导致材料变形阻力增大,从而提高材料表面硬度;而随着抛光压力逐渐增大至 $\geq 3.0\ \text{MPa}$ 时,流道表面出现过磨的子弹流形貌,产生许多凹凸不平的变形区,导致内部应力分布不

均匀,材料之间的晶体结构产生畸变,因此表面硬度降低。

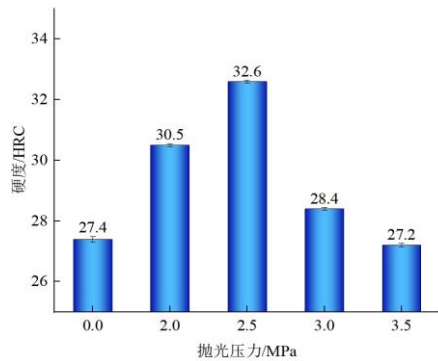


图 11 流道表面洛氏硬度

Fig.11 Rockwell hardness on the surface of the flowpath

3 结论

基于高速水基磨粒两相流新型光整方法,通过改变抛光压力对SLM CoCrMo燃油喷嘴内流道表面进行光整,对比分析了光整前后流道的表面质量、粗糙度、尺寸精度、去除速率及洛氏硬度,主要得出以下结论:

(1) 经SLM制造的CoCrMo燃油喷嘴原始试样内流道表面存在明显的粉末黏附、台阶等缺陷,表面粗糙度约为 $9.090\ \mu\text{m}$ 。随着高速水基磨粒两相流抛光压力由 $2.0\ \text{MPa}$ 增大至 $3.5\ \text{MPa}$,流道表面缺陷从部分去除过渡到完全去除,最终出现过磨的子弹流形貌,表面粗糙度呈现先减小后增大的变化趋势。当抛光压力为 $2.5\ \text{MPa}$ 时,流道表面光滑平整,表面粗糙度达到最小值 $1.415\ \mu\text{m}$ 。

(2) 随着抛光压力由 $2.0\ \text{MPa}$ 增大至 $3.5\ \text{MPa}$,流道口径尺寸逐渐增大,最大值为 $1.291\ \text{mm}$,尺寸精度均在公差允许范围内;去除速率由 $0.0127\ \text{mm/min}$ 单调增大至 $0.0143\ \text{mm/min}$;流道表面洛氏硬度呈现先增大后减小的变化趋势,当抛光压力为 $2.5\ \text{MPa}$ 时,流道表面洛氏硬度达到最大值 $32.6\ \text{HRC}$,较原始试样($27.4\ \text{HRC}$)得到显著提升。通过对流道表面微观缺陷和裂纹的有效去除,减少了表面微区的应力集中,从而提升了合金的整体硬度。过磨的子弹流形貌导致流道表面产生过量变形,影响材料的晶体结构,不利于合金整体硬度的提升。

参考文献

[1] 张超,张永红,毛树根,等.航空燃油喷嘴设计构造及

光学检测技术研究[J].中国机械,2024(9):10-13.

- [2] 赵强,李海,叶才铭,等.燃油喷嘴精密微细零件加工工艺研究[J].航空精密制造技术,2023,59(3):1-3,8.
- [3] 董干,张译元,郝宁宁.商用航空发动机燃油喷嘴雾化锥角测试技术研究[J].价值工程,2023,42(23):101-103.
- [4] 潘登.高能束增材制造硼化钛增强钛基复合材料的尺度效应研究[D].西安:西安理工大学,2023.
- [5] 徐晶.选择性激光熔融成型含铜钴基合金的抗菌性能及生物相容性实验研究[D].沈阳:中国医科大学,2019.
- [6] 赵永胜,葛超,吴影,等.激光熔覆工艺对CoCrMo钴基合金涂层组织与性能的影响[J].表面技术,2024,53(23):216-227.
- [7] Wei M W, Chen S Y, Xi L Y, et al. Selective laser melting of 24CrNiMo steel for brake disc: Fabrication efficiency, microstructure evolution, and properties[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 107: 99-109.
- [8] Asnawi M O, Baharudin B T H T, Sulaiman S, et al. Evaluation of chemical composition, heat treatment, mechanical properties and electro chemical polishing for additively manufactured stent using ASTM F75 cobalt based superalloy (CoCrMo) by selective laser melting (SLM) technology[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2020, 8(4): 1635-1654.
- [9] Tao H W, Yu T, Cao M X, et al. Microstructure and biological application of laser selective melting of CoCrMo alloy[J]. Materials Review, 2024, 38(17): 204-209.
- [10] Ma B, Gao X D, Zhang N F, et al. Research on 3-D reconstruction method of multi-layer single-pass arc additive manufacture surface[J]. Laser Technology, 2020, 44(3): 321-325.
- [11] Du Y, Chen J G, Meng Q F, et al. Thermoelectric materials and devices fabricated by additive manufacturing[J]. Vacuum, 2020, 178, 109384.
- [12] Zhang X L, Yuan J L, Deng Q F, et al. High-speed abrasive flow composite polishing based on dielectrophoresis effect[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(11-12): 8137-8146.
- [13] Zhang C, Zhou P, Yan Y, et al. An efficient electrochemical polishing method with planarization ability employing solid and liquid electrolytes[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169(6): 063506.
- [14] Li J Y, Zhu Z B, Hu J L. Particle collision-based abrasive flow mechanisms in precision machining[J]. International

- Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(7-8): 1819-1831.
- [15] Li J Y, Zhu X, Yang Z J. Precision grinding behavior of micro-holes by solid-liquid two-phase abrasive flow[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2020, 50(3): 903-913.
- [16] Fu Y Z, Gao H, Yan Q S. Rheological characterisation of abrasive media and finishing behaviours in abrasive flow machining[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(7-8): 3569-3580.
- [17] Chen Y, Li X, Chen X. Effects of the laser-water-jet processing of silicon carbide[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2022, 63(1): 11-16.
- [18] Yang Q, Zhang Z J, Yang S H, et al. Study on the characteristics of water jet injection and temperature spatial distribution in the process of hot water deicing for insulators[J]. Energies, 2022, 15(6), 2298.
- [19] Bai Y, Zhang Z Y, Li L X, et al. High precision polishing of aluminum alloy mirrors through a combination of magnetorheological finishing and chemical mechanical polishing[J]. Optics Express, 2024, 32(9): 15813-15826.
- [20] Lv J K, Cao G M. Research progress of metal parts surface finishing technology applied to additive manufacturing in aviation industry[J]. New Technology & New Process, 2021(8): 1-7.
- [21] Yang Y, Li W D, Yang S Q, et al. Experimental study of influence of steel ball on magnetic polishing process[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(3): 98-104.
- [22] Wu M, Chen S F. Experimental study of polishing characteristics of magnetic polishing liquid in magnetic field[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(6): 904-908.
- [23] Park J W, Lee D W. Pulse electrochemical polishing for microrecesses based on a coulometric analysis[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(7/8): 742-748.
- [24] Lin L, He Z W, H T, et al. Review on the development of abrasive water jet polishing technology[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2022, 46(1): 74-91.
- [25] 雷力明, 米天健, 王小康, 等. 微细内流道的表面光整方法、微细内流道工件及光整介质: 中国, ZL202210659821.0[P] 2022-09-09.
- [26] 雷力明, 米天健, 王小康, 等. 光整装置、光整方法以及密封系统: 中国, ZL202210659826.3[P] 2022-09-06.
- [27] Zhu Q, Geubelle P H, Li M, et al. Dimensional accuracy of thermoset composites: simulation of process-induced residual stresses[J]. Journal of Composite Materials, 2001, 35(24): 2171-2205.