

# 异形毛细结构喷注器激光选区熔化成形技术分析

蔡佳欣<sup>1,2</sup>, 白 静<sup>1,2</sup>, 杨欢庆<sup>1,2</sup>, 王 迎<sup>1</sup>

(1. 西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100;

2. 国防科技工业航天特种构件增材制造技术创新中心, 陕西 西安 710100)

**摘要** 异形毛细喷注器是姿控发动机的核心组件, 此类构件对流动内表面质量要求极高。为了实现激光选区熔化成形技术推广应用于上述产品以达到型号产品快速研制的目的, 以异形毛细微孔流动表面质量为研究对象, 利用激光超景深显微镜研究了不同成形角度下小孔表面形貌特征、表面粗糙度的变化规律, 确定了异形毛细结构的成形角度在  $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$  范围内, 成形构件上、下表皮表面质量均良好。基于异形毛细结构表面光整技术研究, 实现了异形毛细结构的均匀光整, 尺寸精度达  $\pm 0.05 \text{ mm}$ , 表面粗糙度小于  $6.3 \text{ }\mu\text{m}$ , 通过液流试验验证了激光选区熔化成形某喷注器液流性能, 实现了异形毛细结构姿控喷注器的高性能一体化成形。

**关键词** 激光选区熔化成形; 成形角度; 表面形貌; 表面光整; 化学铣切

**中图分类号** V461 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)04-0090-09

## Analysis of forming technology of special-shaped capillary injector by selective laser melting

CAI Jiaxin<sup>1,2</sup>, BAI Jing<sup>1,2</sup>, YANG Huanqing<sup>1,2</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>

(1. Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China;

2. Industry Aerospace Special Component Manufacturing Technology Innovation Center of National Defense Technology, Xi'an 710100, China)

**Abstract** The special-shaped capillary injector is the core component of the attitude control engine. This type of component has extremely high requirements for the internal surface quality of the flow channel. In order to promote the application of SLM technology to the above products to achieve the purpose of rapid development of model products, taking the surface quality of the special-shaped capillary micro-porous channel as the research object, the surface morphology and surface roughness of the ostiole under different forming angles were studied by means of laser ultra-depth microscope. The capillary structure with good surface quality can be obtained by adjusting the forming angle within the range of  $75^{\circ} - 90^{\circ}$ . Based on the research of the surface finishing technology of the special-shaped capillary structure, the uniform finishing of the special-shaped capillary structure was realized, the dimensional accuracy is within  $\pm 0.05 \text{ mm}$  and surface roughness is less than  $6.3 \text{ }\mu\text{m}$ . The liquid flow performance of the injector by

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2023-05-20

基金项目: 国防科工局基础科研课题 (JCKY2021203B052)

作者简介: 蔡佳欣 (1997—), 男, 硕士, 研究领域为激光增材制造技术、液体火箭发动机制造。

SLM was verified by the liquid flow test, and the high performance integrated forming of the special-shaped capillary structure attitude control injector was realized.

**Key words** selective laser melting; forming angle; surface morphology; surface finish; chemical milling

## 0 引言

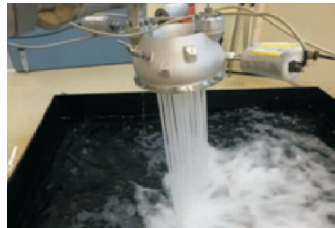
喷注器是姿控发动机的核心组件,其功能是使推进剂按一定流量和混合比进入燃烧室雾化、混合和燃烧,其整体结构呈莲蓬式,由法兰盘、喷注盘、隔热框和多根异形毛细喷注管等组成。异形毛细管外径为 1.0 ~ 1.5 mm,内径  $\leq 0.9$  mm,长径比  $\geq 100:1$ ,呈空间异形扭曲结构,其成形表面质量、成形精度直接影响发动机性能,要求管径尺寸精度在  $\pm 0.05$  mm 范围内,成形表面粗糙度小于  $6.3 \mu\text{m}$ <sup>[1-2]</sup>。激光选区熔化成形技术(SLM 技术)通过激光高能束实现金属粉末的逐点、逐线、逐面叠加,可实现复杂零件的高致密度一体化成形,在国内外航天领域已开始了一系列工程应用<sup>[3-5]</sup>。但是,目前选区激光熔化成形表面粗糙度一般在  $6.3 \sim 12.6 \mu\text{m}$  范围内,成形精度偏差在  $\pm 0.2$  mm 范围内<sup>[6-8]</sup>,针对异形毛细喷注管结构等精细特征高精度成形技术未获得突破,限制了选区激光熔化成形技术在姿控发动机毛细结构喷注器上的研制生产。

针对异形毛细喷注管结构的高质量 SLM 成形,刘洋研究了成形角度为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时孔的成形精度及形成形状误差的机理,通过总结成形件表面形貌特征提出了一系列衡量圆孔成形质量的评价参数<sup>[9]</sup>;杨雄文等研究了 0.2 ~ 3 mm 直径范围内水平孔与竖直孔的孔径变化规律,并将圆孔直径的绝对误差与相对误差改变原因进行了分析<sup>[10]</sup>;Pakkanen 等研究了 SLM 成形 AlSi10Mg 和 Ti6Al4V 合金不同形状、成形角度下的孔的表面质量,从成形材料角度对微孔表面质量进行了比较分析<sup>[11]</sup>。另外,金属增材制造技术所特有的“阶梯效应”“球化效应”“粉末包覆”等问题使得成形表面粗糙度较高,显著影响喷注器压降和雾化效果等功能性指标,因此表面光整技术的研究也十分重要,目前针对金属增材制造构件的表面光整技术包括化学铣削抛光、电化学抛光及磁力研磨光整技术等,但关于异形毛细结构的表面光整技术的相关研究仍较为匮乏<sup>[12-14]</sup>。针对

SLM 成形构件的表面处理,欧洲空客防卫与航天公司对 Vulcain 2 发动机喷注器喷嘴、燃料/氧化剂通道上  $\phi 0.6 \sim 5$  mm 的圆孔进行基于 SLM 工艺的重新设计优化,并依次进行了单喷嘴液流试验、试件点火试验及全尺寸液流试验(见图 1),形成了 SLM 一体化高质量成形喷注器结构。



(a) 缩比试件点火试验



(b) 全尺寸液流试验

图 1 SLM 成形 Vulcain 2 发动机喷注器测试过程

Fig. 1 Test of Vulcain 2 injector manufactured by SLM

本文以喷注器异形毛细喷注管表面质量为研究对象,利用激光超景深显微镜研究了不同成形角度下小孔表面形貌特征、表面粗糙度的变化规律,在获得最佳成形角度基础上,通过异形毛细结构表面光整技术研究,实现了异形毛细结构的均匀光整,提升其表面质量。通过液流试验,验证了激光选区熔化成形某喷注器液流性能,实现了异形毛细结构姿控喷注器的高性能一体化成形。

## 1 加工条件

### 1.1 加工设备及材料

本文激光选区熔化成形所用设备为 BLT-S300 型激光选区熔化成形设备(见图 2),设备装配一台 YLR-500-WC 型光纤激光器(光斑直径  $70 \mu\text{m}$ ,波长 1.07 mm,最大输出功率 500 W),成形幅面为

250 mm × 250 mm。

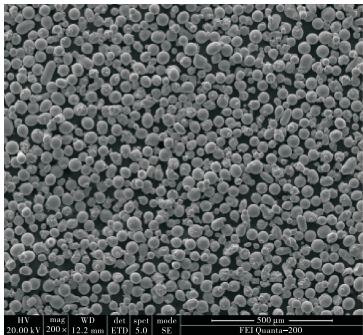
实验所用 06Cr19Ni10 不锈钢粉末各元素质量分数检测结果如表 1 所示,粉末形貌及粒度分布如图 3 所示。粉末使用前,将粉末置于真空干燥箱内,进行 110 ℃ 烘干处理,以除去粉末中吸附的水分,防止粉末在铺粉时产生团聚现象,影响铺粉质量。基板材质为不锈钢,成形前对基板表面喷砂毛化。激光选区熔化成形过程中使用纯度为 99.999 % 的氩气作为保护气体,并且始终保证氧含量在 0.05 % 以下。



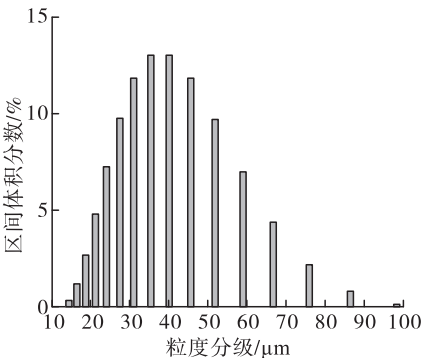
图 2 BLT-S300 型激光选区熔化成形设备  
Fig.2 Selective laser melting forming equipment of BLT-S300

表 1 06Cr19Ni10 不锈钢粉末各元素质量分数

Tab.1 Mass fraction for different element of 06Cr19Ni10 stainless steel powder							单位: %
$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Fe})$
$\leq 0.08$	$\leq 1.00$	$\leq 2.00$	$\leq 0.045$	$\leq 0.03$	18 ~ 20	8 ~ 11	余量



(a) 粉末形貌



(b) 粒度分布

图 3 06Cr19Ni10 不锈钢粉末形貌和粒度分布

Fig.3 Morphology and particle size distribution of 06Cr19Ni10 stainless steel powder

1.2 模型设计及实验方法

以液体火箭发动机喷注器中的典型喷注孔径  $\phi 1.4\text{ mm}$  的小孔为研究对象,设计如图 4 所示的小孔模型单元,其成形角度(小孔轴线与成形平台夹角)分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$ 。

小孔结构成形工艺参数如表 2 所示。成形后,沿各成形角度方向将小孔试样块均分为上下两部分。上部分小孔内表面为下表皮,采用下表皮的成形工艺参数;下部分小孔内表面为上表皮,采用上表皮的成形工艺参数。

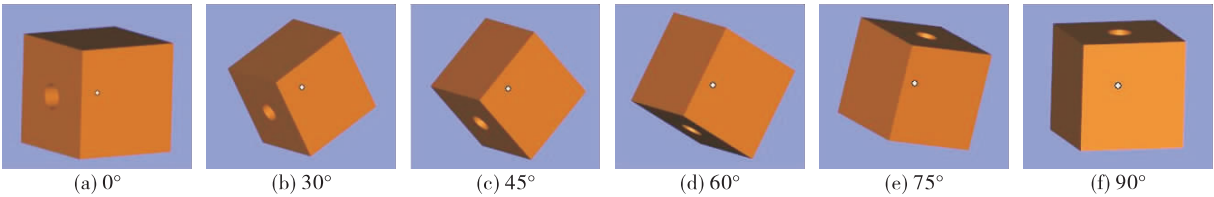


图 4 不同成形角度小孔模型结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of keyhole model in different forming angles

采用激光超景深显微镜观察小孔结构上下表皮表面形貌并测量其对应的粗糙度,测量精度为  $0.3\text{ }\mu\text{m}$ ,测量 3 次取平均值。

表 2 小孔结构成形工艺参数  
Tab. 2 Small holes process parameters

区域	激光功率/ W	扫描速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	扫描间距/ mm
内填充	220	800	0.10
外圈	56	700	—
上表皮	101	600	0.08
下表皮	105	2 000	0.05

2 结果与讨论

2.1 小孔结构表面形貌特征

随着成形角度的变化( $0^\circ \sim 90^\circ$ ),小孔结构下表皮及上表皮表面形貌呈现不同的变化趋势。不同成形角度下小孔宏观形貌见图 5。小孔结构下表皮表面形貌如图 6 所示。当成形角度为  $0^\circ \sim 30^\circ$

时,下表皮区域发生严重的挂渣塌陷现象,表面分布大量大尺寸的挂渣塌陷颗粒( $\phi 200 \sim 300\text{ }\mu\text{m}$ );当成形角度为  $30^\circ \sim 45^\circ$ 时,表面分布有少量大尺寸挂渣塌陷颗粒及大量小尺寸挂渣塌陷颗粒( $\phi 100 \sim 120\text{ }\mu\text{m}$ );当成形角度达到  $45^\circ$ 时,小孔结构下表皮挂渣塌陷颗粒基本消失,分布有飞溅颗粒( $\phi 100\text{ }\mu\text{m}$ )及半熔化金属粉末颗粒;当角度进一步从  $45^\circ$ 增大到  $75^\circ$ 时,表皮分布的飞溅颗粒尺寸及数量进一步减小( $70 \sim 80\text{ }\mu\text{m}$ );当成形角度为  $75^\circ \sim 90^\circ$ 时,表面主要分布为半熔化金属粉末颗粒( $\phi 20 \sim 40\text{ }\mu\text{m}$ ),飞溅颗粒基本消失。

小孔结构上表皮呈现与下表皮不同的表面形貌,如图 7 所示。当成形角度为  $0^\circ$ 时,成形表面光滑,几乎没有黏附的颗粒物,可看到原始的扫描线痕迹<sup>[15-16]</sup>;随着成形角度的增加,小孔表面逐渐开始黏附未完全熔化的金属粉末颗粒,且成形角度越大,黏附的粉末颗粒物越多;到  $75^\circ$ 时达到稳定。

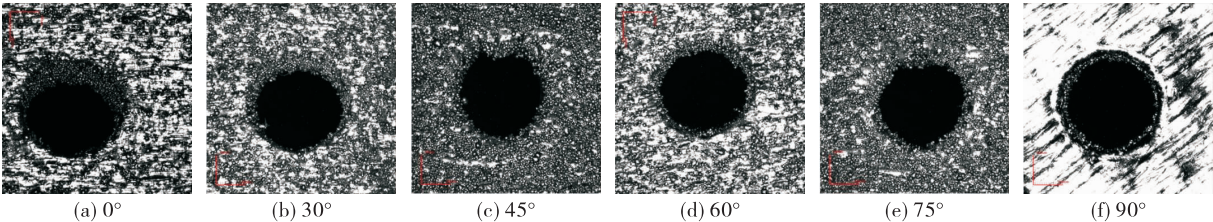


图 5 不同成形角度下小孔宏观形貌  
Fig. 5 Macro-morphology of small holes at different forming angles

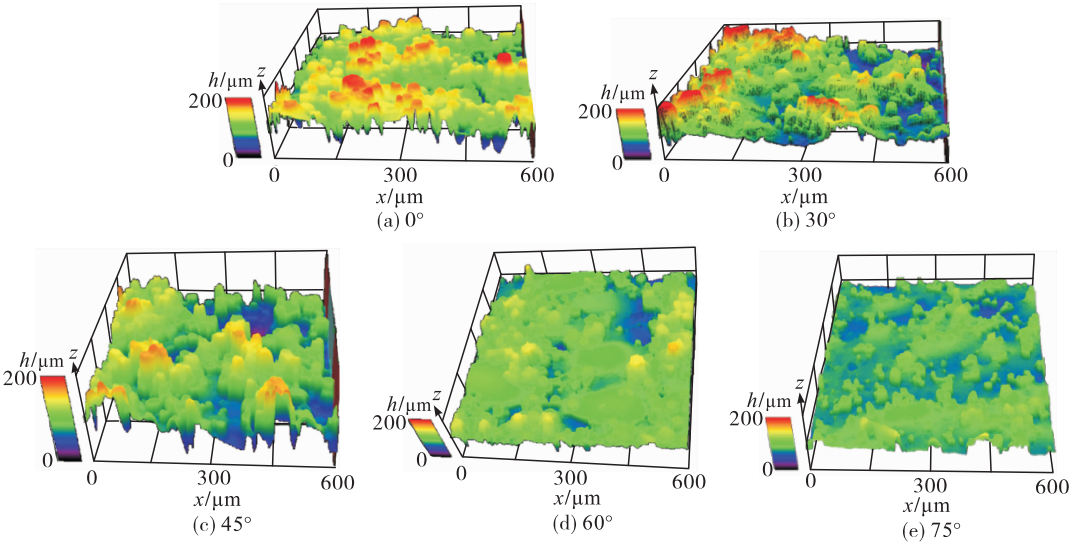


图 6 不同成形角度小孔下表皮表面粗糙度形貌  
Fig. 6 The morphology of down-skin surface for small holes at different forming angles



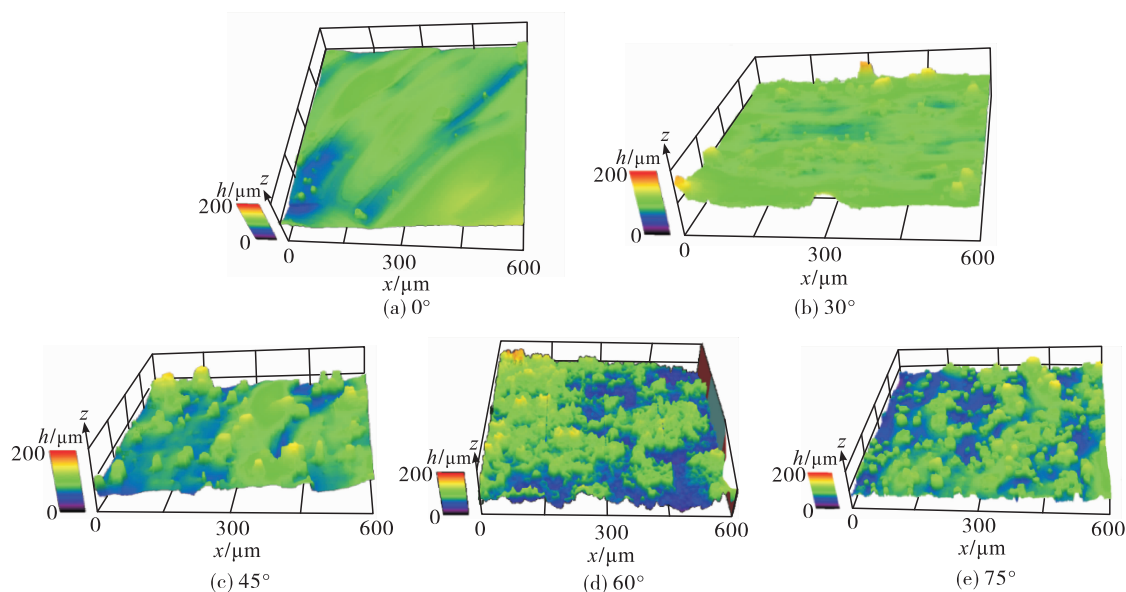


图 7 不同成形角度小孔上表皮表面粗糙度形貌

Fig. 7 The morphology of up-skin surface for small holes at different forming angles

小孔结构上、下表皮之所以呈现不同的表面形貌,且其随成形角度的增加,呈现不同的变化趋势,主要是因为 SLM 成形过程中,不同成形角度上、下表皮的位置及状态不同。对于下表皮,其悬垂结构的生长支撑为部分已成形实体和松装粉末,由于激光深穿透作用,在松装粉末上方的金属溶液在重力和毛细力作用下下垂,产生挂渣塌陷现象<sup>[17]</sup>。

当角度为  $0^\circ$  时,下表皮悬垂结构生长支撑完全为松装粉末,故挂渣塌陷最明显,所以表面形成大量挂渣塌陷颗粒物;随着成形角度的增加,与粉末接触的悬垂结构的面积减小,金属溶液挂渣塌陷现象逐渐减弱直至消失;当成形角度增加到  $45^\circ$  时,已成形实体基本上可支撑熔融的金属熔池,故金属溶液挂渣塌陷现象基本消失,但其部分面积的熔池仍与粉末接触,熔池热量需通过粉末扩散,在室温条件下,金属粉末的有效热导率通常为  $0.1 \sim 0.2 \text{ W/mK}$ ,仅为实体热导率的  $1/100 \sim 1/1\,000$ <sup>[18]</sup>,粉末与实体扩散速度的差异,使熔池易产生过热,导致金属液熔池失稳,形成飞溅颗粒黏附在表面,所以分布有大量飞溅颗粒物 ( $\phi 100 \mu\text{m}$ );当成形角度为  $75^\circ \sim 90^\circ$  时,熔池下方基本上没有松装的金属粉末,熔池失稳现象消除,飞溅颗粒物消失,而由于激光热源

的高斯分布特点,会使部分金属粉末处于半熔状态,附着于已凝固表面,故在表面形成未完全熔化的金属粉末颗粒 ( $20 \sim 40 \mu\text{m}$ )。而对于上表皮,在成形过程中,其有上一层已成形的实体层作为其生长支撑点,熔池内金属溶液不会发生坍塌,也不会由于热量累积导致飞溅,故表面不会生成挂渣塌陷颗粒物和飞溅颗粒物,只分布有由于激光高斯分布而产生的未完全熔化金属粉末。上表皮粉末逐渐恶化主要是因为随着成形角度的增大,表面与周围粉末接触的面积增大,成形过程中熔池及热影响区覆盖的区域增大,故而粉末黏附逐渐恶化。

## 2.2 小孔结构表面粗糙度测量分析

表面粗糙度是指加工表面具有的较小间距和峰谷不平度<sup>[19]</sup>,是表征表面质量的重要技术指标。表 3 为不同成形角度下,小孔结构上、下表皮的面粗糙度测量值,图 8 为其变化规律。

从表 3 和图 8 中可以看出,上、下表皮粗糙度随角度的变化呈现不同的变化规律。随着成形角度的增加,下表皮的表面粗糙度逐渐降低,到  $75^\circ$  时趋于稳定;上表皮的表面粗糙度逐渐上升,在  $75^\circ$  时也趋于稳定。且成形角度在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内,小孔结构上表皮的粗糙度均小于下表皮。

表 3 不同成形角度下小孔的表面粗糙度

Tab. 3 The surface roughness of keyhole at different forming angles

成形角度/(°)	表面粗糙度/ $\mu\text{m}$	
	上表皮	下表皮
0	2.834	28.231
30	3.196	22.893
45	5.172	15.789
60	5.723	11.789
75	6.173	8.435
90	6.920	8.201

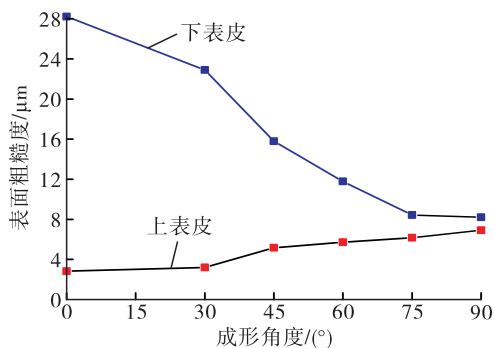


图 8 小孔表面粗糙度随成形角度变化关系

Fig. 8 The relation between the surface roughness and the forming angle of keyhole

由此可见,表面形貌的变化对表面粗糙度有较大影响,而表面形貌的变化主要受成形角度的影响。为在 SLM 成形中获得上、下表皮表面质量均良好的小孔结构,应充分考虑小孔的空间位置摆放,调整小孔的成形角度,使其在  $75^\circ \sim 90^\circ$  范围内尽量减小甚至避免大尺寸挂渣塌陷颗粒、小尺寸挂渣塌陷颗粒及飞溅颗粒物等形貌。

### 2.3 小孔结构表面光整结果分析

精密化学抛光是将零件置于一定的化学溶液中,在特定条件下,对零件基体材料进行腐蚀,达到提高零件表面粗糙度的工艺方法。该工艺具有铣切量均匀、易于控制的特点,特别适用于尺寸精度高、形状复杂的增材制造零件的精密微量铣切。本节以毛细结构这一典型特征结构单元为例,采用精密化学抛光研究化学溶液压力、工艺装备、抛光工艺参数对毛细结构尺寸精度和表面质量的影响。

#### 2.3.1 化铣溶液交换均匀性控制分析

当毛细结构孔径较小时,受结构及溶液流动阻力的影响,毛细结构流道内溶液交换作用弱,化铣一定时间后,化学溶液的浓度出现降低,且各部分存在浓度差,进而会导致化铣抛光不到位或不均匀。为保证整个化铣过程中溶液在毛细结构内均匀流动,消除溶液温差及浓差极化的影响,确保抛光均匀性,需设计循环流动专用化铣工装及设置合适的压力。

本节所用化学抛光溶液为盐酸、硝酸、氢氟酸等混合溶液,比例为  $4:3:1$ ,化铣溶液交换均匀性试验设置了  $0.6\text{ mm}$ 、 $0.7\text{ mm}$ 、 $0.8\text{ mm}$ 、 $0.9\text{ mm}$  这 4 种孔径,  $60^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $30^\circ$  这 3 种成形方向的毛细结构试验件,为保证一定数量子样,确保研究的可靠性,每种方向相同孔径的毛细结构各 3 个,采用激光选区熔化成形制造,试验件模型示意图见图 9。

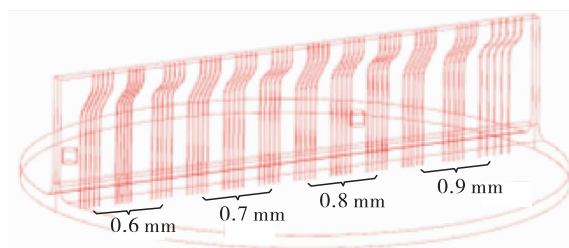


图 9 毛细结构试验件

Fig. 9 Capillary structure test piece

基于毛细结构试验件结构特征,设计引流板状工装(工装中央区域开  $2\text{ mm}$  的横槽、直径  $10\text{ mm}$  的孔及 4 个直径  $5\text{ mm}$  的螺纹孔,通过螺栓将试验件与产品相连,通过管将电动泵与工装相连)。泵的输出压力是影响毛细结构试验件化铣效果的关键参数。当入口压力较小时,化铣溶液不能有效填充毛细结构内流道,导致溶液无法均匀流出,而入口压力过大时,溶液流道速度过快,影响化学溶液与试验件表面的化学反应效果。为研究溶液压力对毛细结构试验件化铣效果的影响规律,设置了  $0.1\text{ MPa}$ 、 $0.2\text{ MPa}$ 、 $0.3\text{ MPa}$ 、 $0.4\text{ MPa}$  这 4 种不同入口压力,对毛细结构试验件进行化铣,观察化铣溶液流动效果、化铣后的表面质量并测量分析化铣后孔径变化。

图 10 为不同压力下化铣溶液的流动效果图。

从图 10 中可以看出,0.1 MPa、0.2 MPa 压力下,部分毛细结构位置未看到流动溶液;0.3 MPa、0.4 MPa 压力下,全部毛细结构都可看到均匀流动的化铣溶液。这表明 0.1 MPa、0.2 MPa 压力较小,难以实现化铣溶液的均匀流动;0.3 MPa、0.4 MPa 压力可实现化铣溶液的均匀流动。

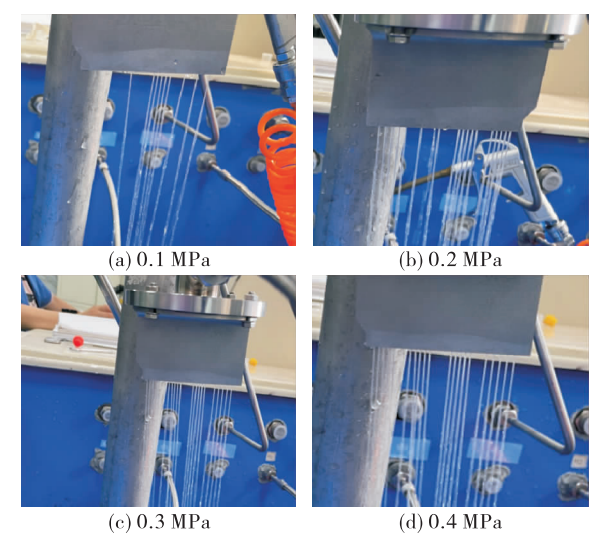


图 10 不同压力下试验件化铣溶液流动效果  
Fig. 10 Flow effect of chemical wash solution for test piece under different pressures

为确定 0.3 MPa、0.4 MPa 压力下的化铣效果,采用塞棒测量毛细结构试验件中 0.9 mm 孔的孔径,孔径去除量见表 4。测量完成后进行剖切,采用电镜观察化铣表面,见图 11 ~ 图 12。从表 4 及图 11 ~ 图 12 中可看出,相较 0.4 MPa 压力,0.3 MPa 压力下的毛细结构化铣去除量较大,且表面质量高。在 0.3 MPa 压力下,化铣溶液的流量测量结果为 1.5 ~ 2.2 g/s;0.4 MPa 压力下,溶液流道速度过快(流量 > 2.5 g/s),影响了溶液与毛细结构内表面的化学反应。

表 4 不同压力下毛细结构化铣去除量  
Tab. 4 Removal of capillary structured milling under different inlet pressure

压力/MPa	孔径去除量/mm
0.3	0.03
0.4	0.01

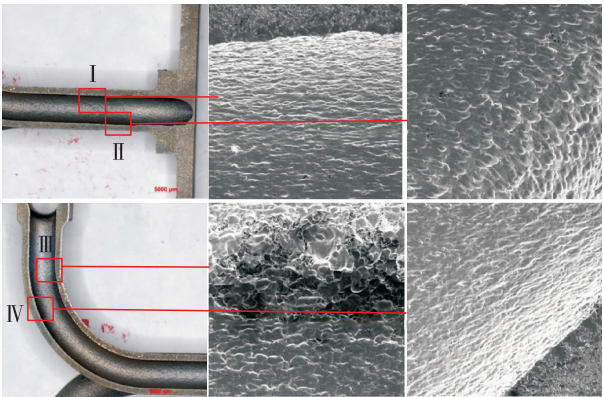


图 11 0.3 MPa 入口压力下化铣后流道 4 处位置表面形貌  
Fig. 11 Surface morphology of flow channel in four position when the inlet pressure is 0.3 MPa

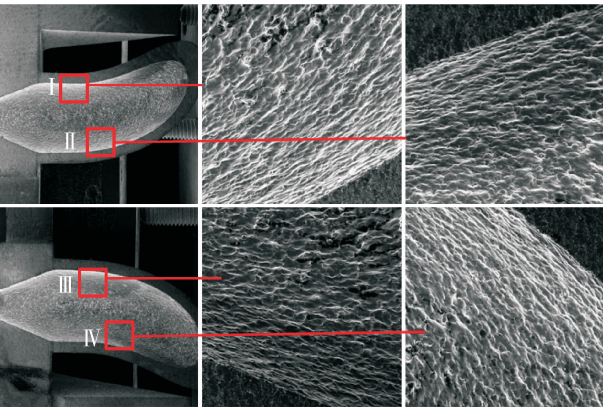


图 12 0.4 MPa 入口压力下化铣后流道 4 处位置表面形貌  
Fig. 12 Surface morphology of flow channel in four position when the inlet pressure is 0.4 MPa

基于上述分析可知,通过设计导流工装及入口压力工艺试验,获得了 0.6 ~ 0.9 mm 范围内不同构型毛细管的最优溶液流速工艺参数。

2.3.2 化铣工艺参数分析

在最优流速工艺参数基础上,本节研究不同化铣时间对毛细结构表面的影响规律。图 13、图 14 分别为不同化铣时间下毛细结构特征形貌图及表面三维图。从图 13 中可以看出,化铣时间由 1 min 增加至 4 min,结构表面粗糙度逐渐改善;当化铣时间为 4 min 时,结构表面质量最好;而随着化铣时间进一步增加,圆孔孔径大于理论模型值,对尺寸精度产生了较大影响。通过表 5 可得,当化铣时间为 4 min 时,圆孔直径尺寸误差绝对值最小,表面粗糙度也得到了明显改善。



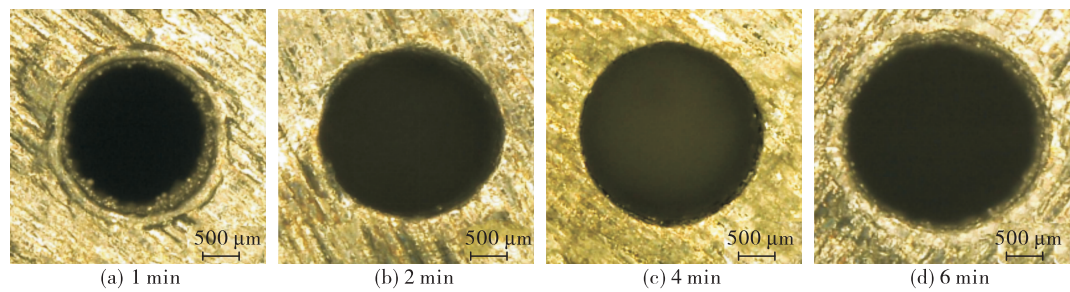


图 13 不同化铣时间下圆孔结构特征形貌图

Fig. 13 Morphological map of circular hole structure features under different chemical milling time

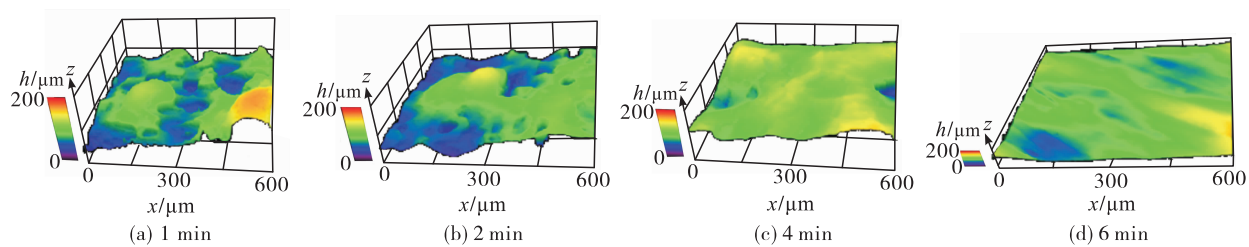


图 14 不同化铣时间下圆孔表面三维图

Fig. 14 Three-dimensional image of circular hole surface under different chemical milling time

表 5 化铣时间与圆孔孔径误差、表面粗糙度的关系  
Tab. 5 Relationship between chemical milling time, aperture error and surface roughness of circular hole

参数	化铣时间/min			
	1	2	4	6
实测孔径/mm	1. 35	1. 36	1. 39	1. 43
孔径误差/mm	0. 05	0. 04	0. 01	0. 03
表面粗糙度/μm	5. 1	3. 6	2. 3	1. 4

2. 4 液流试验验证

基于前文中对异形毛细结构表面质量以及表面光整技术的研究,采用激光选区熔化成形技术完成了异形毛细喷注器的一体化制备,并进行了液流试验(见图 15),目标值为流量 100 g/s 时,压降为 (0. 20 ±0. 04) MPa。



图 15 SLM 成形异形喷注器液流试验图

Fig. 15 Test chart of liquid flow for special-shaped spray injector made by SLM

通过液流试验数据(见表 6)可得,当孔径为 0. 9 mm 时,激光选区熔化成形毛细结构喷注器液流压降及均匀性均符合使用要求。

表 6 不同模型孔径下喷注器液流实测值  
Tab. 6 Measurement of liquid flow in injector under different model apertures

模型 孔径/mm	流量/ (g · s <sup>-1</sup> )	压降/MPa	100 g/s 流量 时压降/MPa
0. 8	86. 6	0. 49	0. 65
0. 9	125. 2	0. 31	0. 20
1. 0	120. 3	0. 06	0. 04

3 结论

- 1)随着成形角度的增加,下表皮的表面形貌从大尺寸挂渣塌陷颗粒状逐渐过渡到大尺寸挂渣塌陷颗粒+小尺寸挂渣塌陷颗粒、飞溅颗粒物+未完全熔化金属粉末状、未完全熔化金属粉末颗粒状。上表皮表面形貌主要是未完全熔化金属粉末颗粒状,随着成形角度的增加,未完全熔化金属粉末的数量及尺寸逐渐增大,达到 75°时趋于稳定。
- 2)表面形貌的变化对表面粗糙度有较大影响,



为在 SLM 成形中获得上、下表皮表面质量均良好的异形毛细结构,应充分考虑空间位置摆放,调整成形角度,使其在  $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$  范围内。

3) 通过化铣均匀性工装及化铣参数的控制,实现了异形毛细结构精细特征的高精度增材成形及表面光整技术,尺寸精度达  $\pm 0.05 \text{ mm}$ ,表面粗糙度小于  $6.3 \mu\text{m}$ ,提升了以毛细结构为代表的精细结构成形能力,为后续液体火箭发动机高精度喷注器整体制造提供技术支撑。

### 参考文献

- [1] 谭松林,李宝盛. 液体火箭发动机可靠性[M]. 北京:中国宇航出版社,2014.
- [2] 黄舰,林庆国. 姿轨控发动机开机充填和关机传热特性[J]. 火箭推进,2022,48(4):43-50.  
HUANG J, LIN Q G. Start-up filling process and heat transfer characteristics of shutdown in attitude and orbit control engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(4): 43-50.
- [3] KRUTH J P, FROYEN L, VAN VAERENBERGH J, et al. Selective laser melting of iron-based powder[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1/2/3): 616-622.
- [4] BIRSER E M, MOSKYITIN G V, POLYAKOV A N, et al. Industrial laser cladding: Current state and future[J]. Welding International, 2011, 25(3): 234-243.
- [5] 左蔚,宋梦华,杨欢庆,等. 增材制造技术在液体火箭发动机应用述评[J]. 火箭推进,2018,44(2):55-65.  
ZUO W, SONG M H, YANG H Q, et al. Application of additive manufacturing technology in liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(2): 55-65.
- [6] CRAEGHS T. A monitoring stem for on-line control of selective laser melting[D]. Belgium: Catholic University of Leuven, 2012.
- [7] MERTENS R, CLIJSTERS S, KEMPEN K, et al. Optimization of scan strategies in selective laser melting of aluminum parts with downfacing areas[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(6): 061012.
- [8] CLIJSTERS S. A priori process parameter adjustment for SLM process optimization[M]. New York: Taylor & Francis Group, 2012.
- [9] 刘洋. 激光选区熔化成型机理和结构特征直接制造研究[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
- [10] 杨雄文,杨永强,刘洋,等. 激光选区熔化成型典型几何特征尺寸精度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 70-79.
- [11] PAKKANEN J, CALIGNANO F, TREVISAN F, et al. Study of internal channel surface roughnesses manufactured by selective laser melting in aluminum and titanium alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(8): 3837-3844.
- [12] URLEA V, BRAILOVSKI V. Electropolishing and electropolishing-related allowances for powder bed selectively laser-melted Ti-6Al-4V alloy components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 242: 1-11.
- [13] MARECI D, CHELARIU R, SUTIMAN D, et al. Evaluating electrochemical behaviour of recrystallized titanium alloys in Ringer's solution[J]. Materials and Corrosion, 2011, 62(12): 1117-1123.
- [14] VAN HOOREWEDER B, MOENS D, BOONEN R, et al. Analysis of fracture toughness and crack propagation of  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  produced by selective laser melting[J]. Advanced Engineering Materials, 2012, 14(1/2): 92-97.
- [15] 段声勤,刘婷婷,廖文和,等. 悬垂圆孔激光选区熔化成形质量研究[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 190-198.
- [16] 麦淑珍,杨永强,王迪. 激光选区熔化成型 NiCr 合金曲面表面形貌及粗糙度变化规律研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 96-105.
- [17] 卢建斌,杨永强,王迪,等. 选区激光熔化成型悬垂面质量的影响因素分析[J]. 激光技术, 2011, 35(2): 148-151.
- [18] ROMBOUTS M, FROYEN L, GUSAROV A V, et al. Photo-pyroelectric measurement of thermal conductivity of metallic powders[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(2): 024905.
- [19] 刘睿诚. 激光选区熔化成型零件表面粗糙度研究及在免组装机中的应用[D]. 广州:华南理工大学, 2014.