



DOI: 10.12086/oe.2020.190654

## 水导激光加工对 316L 不锈钢 微观形貌的影响规律

于永飞<sup>1,2,3</sup>, 乔红超<sup>1,3\*</sup>, 曹治赫<sup>1,3</sup>, 赵吉宾<sup>1,3\*</sup>,  
张旖诺<sup>1,3,4</sup>, 吴嘉俊<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;

<sup>2</sup>东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819;

<sup>3</sup>中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169;

<sup>4</sup>中国科学院大学, 北京 100049

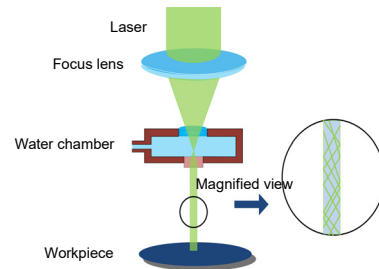
**摘要:** 水导激光加工是一项利用水光纤将激光引导到材料加工表面的新颖加工技术, 具有几乎无微裂纹、热影响区小、无污染、重熔层少、加工精度高和光束平行等优点。为研究不同水导激光加工工艺参数对微观形貌的影响, 探索水导激光与物质的相互作用机理。本文采用自主研发的水导激光加工系统对 316L 不锈钢薄片试件进行切槽和打孔实验; 使用 Zeiss Vert.A1 金相显微镜观察加工试件的二维形貌; 使用 Leica DVM6 超景深显微镜和 Bruke Contour Elite I 白光干涉仪观察试件的三维微观形貌。实验结果表明: 无论是对试件进行切槽还是打孔实验, 均会在加工区域产生一定宽度的沉积层, 且沉积层的大小不随加工时间和加工次数变化, 其宽度约为 13.5  $\mu\text{m}$ ; 通过观察试件加工区域的二维形貌, 发现打孔试件的  $d_f$  和切槽试件的  $w_f$  也不随加工试件和加工次数变化; 通过观察切槽试件加工区域的三维形貌, 其截面呈倒梯形。

**关键词:** 水导激光加工; 316L 不锈钢; 切槽; 打孔; 微观形貌

**中图分类号:** TN249; TG485

**文献标志码:** A

**引用格式:** 于永飞, 乔红超, 曹治赫, 等. 水导激光加工对 316L 不锈钢微观形貌的影响规律[J]. 光电工程, 2020, 47(11): 190654



## Effect of water-guided laser machining technology on micro-morphology of 316L stainless steel

Yu Yongfei<sup>1,2,3</sup>, Qiao Hongchao<sup>1,3\*</sup>, Cao Zhihe<sup>1,3</sup>, Zhao Jibin<sup>1,3\*</sup>, Zhang Yinuo<sup>1,3,4</sup>, Wu Jiajun<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

<sup>3</sup>Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110169, China;

<sup>4</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Water-jet guided laser (WJGL) machining is a novel processing technology using water beam fibers to guide the laser to machine the work-piece surface. This processing technology has the advantage of almost no mi-

收稿日期: 2019-11-02; 收到修改稿日期: 2019-12-25

基金项目: 国家基金委-辽宁省联合基金资助项目(U1608259); 国家自然科学基金资助项目(51875558)

作者简介: 于永飞(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光加工工程的研究。E-mail: yuyongfei@sia.cn

通信作者: 乔红超(1982-), 男, 研究员, 主要从事激光加工工程的研究。E-mail: hcqiao@sia.cn

赵吉宾(1970-), 男, 研究员, 主要从事激光加工工程的研究。E-mail: jbzhaos@sia.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

cro-cracks, small heat-affected zone, pollution-free, less recast layer, high processing accuracy, parallel cuffing, etc. This work aims to investigate the effect of different WGLM parameters on the micro-morphology of materials and the mechanism between lasers and materials. The experiments for slotting and grooving 316L stainless steel thin samples were used by the WGLM system developed by our research group in this work. The 2D micro-topography after experiments were tested by the Zeiss Vert.A1 metalloscope, and the 3D micro-topography of samples after experiments were tested by the Leica DVM6 optical microscope with the large depth of field & Bruke Contour Elite I white-light interferometer. Experimental results show that a certain width deposition layer can be occurred in the machining region, and the width of deposition layers does not change with the parameter of the machining time and the number of machining times. From the 2D micro-topography of samples, it can be found that the 'd<sub>r</sub>' of slotting samples and the 'w' of grooving samples also do not change with the machining parameters. From the 3D micro-topography of grooving samples, it can be found that the cross-section shape is inverted trapezoid.

**Keywords:** water-jet guided laser machining; 316L stainless steel; grooving; slotting; micro-morphology

**Citation:** Yu Y F, Qiao H C, Cao Z H, *et al.* Effect of water-guided laser machining technology on micro-morphology of 316L stainless steel[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, **47**(11): 190654

## 1 引言

随着航空发动机推力和推重比的增加,飞机涡轮发动机热端的工作温度已经达到 1400 K 以上,为使叶片在超高温下能正常工作,目前采用的方法主要是在叶片上喷热障涂层和设计气膜孔结构<sup>[1]</sup>。合金类高温叶片材料从外到里,包括环境保护涂层、热障涂层、结合层和高温合金层。叶片上具有 3D 曲面和中空内腔,打孔的斜度在 30°到 15°,使得飞机发动机的气膜冷却孔加工面临重大挑战。传统的气膜孔加工方法有电火花加工和激光加工。电火花依靠电极放电过程去除材料<sup>[2-3]</sup>,无法对非导电的陶瓷涂层涡轮叶片进行加工。激光加工依靠高功率密度激光束照射工件使材料迅速熔化、汽化、烧灼或达到燃点<sup>[4]</sup>,因此产生热影响区和沉积层等热缺陷<sup>[5]</sup>,即使是激光-水射流混合加工,也会使加工材料表面产生一定程度的氧化和相变<sup>[6]</sup>。水导激光加工(Water-jet guided laser, WJGL)是一种新型的精密特种加工方法,具有加工精度高,热影响区小,重熔层少,几乎无微裂纹,加工距离长,光束平行,切缝边缘光滑无毛刺等优点<sup>[7]</sup>,能够很好地解决传统气膜孔加工存在的问题。

自水导激光加工技术诞生以来,国内外许多学者开展了相关研究。Li 等<sup>[8-9]</sup>研究了水导激光分别加工镁合金和钛合金实验,并与传统激光加工方法进行了对比,发现水导激光加工在表面质量和清洁度方面具有明显优势;此外,在激光束与材料相互作用区域,高压水射流有助于去除熔融金属,并在表面材料上提供强大的冷却效果,影响材料表面的微观结构,减小热影响区(HAZ 层)的厚度<sup>[10]</sup>。孙冬等<sup>[11]</sup>发现相比水辅助

激光加工,水导激光加工的槽道表面干净熔渣少,无毛刺,热影响区较小,适用于晶圆的高精划片切割加工。Reshed 等<sup>[12]</sup>用 SHFM 测量对比了电火花加工和水导激光加工喷嘴孔的内表面形貌和粗糙度,发现水导激光加工更能获得光滑的内表面。以上研究表明:与传统加工方法相比,水导激光加工技术具有明显优势;然而他们并没有系统地研究加工时间和加工次数等工艺参数对试件加工效果的影响。

本文以 316L 不锈钢薄片为实验试件,通过改变工艺参数对实验试件进行了切槽和打孔实验。所得实验结果能够给水导激光加工工艺参数的优化提供理论指导,对促进水导激光加工技术的发展具有重要意义。

## 2 实验

### 2.1 实验材料

实验采用轧制而成的 316L 不锈钢薄片,通过线切割加工成 20 mm×10 mm×3 mm 规格的实验试件。该材料的化学成分及室温下的热物理性能参数详见表 1 和表 2。实验前需要对试件表面进行研磨抛光处理至表面无划痕,再用无水乙醇清洗吹干留作备用<sup>[13-14]</sup>。

### 2.2 实验装置

实验采用本实验室自主研发的水导激光加工系统,该系统主要由激光器、水净化系统、水-激光耦合系统、三维工作平台、CCD 相机、计算机等组成。其中,所采用的激光器为 Nd:YAG 固体激光器,其主要参数为:激光功率 21 W,脉宽 10 ns,波长 532 nm,重复频率 32.7 kHz,电流 5.5 A;采用的三维工作平台的最高输出频率可达 4 MHz,该平台可以保证在笛卡

表 1 316L 不锈钢主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of the 316L stainless steel

Chemical composition	Content%
C	≤0.03
Si	≤1.00
Mn	≤2.00
S	≤0.03
P	≤0.04
Cr	16~18
Ni	10~14
Mo	2~3

表 2 316L 不锈钢的热物理性能参数

Table 2 Physical property parameters of the 316L stainless steel

Physical property parameters	Value
Yield strength/MPa	≥175
Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	7.98
Thermal conductivity/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	15.1
Hardness/HRB	≤90
Specific heat capacity/(J·g <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.502
Thermal expansion coefficient/(°C)	17.3×10 <sup>-6</sup>

尔坐标系下进行 0.01 mm 级的精确运动。水导激光加工系统示意图如图 1 所示。

### 2.3 实验参数

水导激光加工技术原理如图 2 所示<sup>[15]</sup>，通过调整聚焦透镜将激光聚焦到喷嘴孔上表面中心，进入水柱中。当激光入射角大于全反射的临界角时，激光在水-空气界面发生全发射。在水的引导下，保持恒定的激光能量密度对试件进行加工。此外，水还可以起到冷却工件和冲洗熔融物的作用。

研究不同加工次数对实验试件切槽效果的影响，加工次数依次为：10、20、40、50、60、80 次，切缝长度为 10 mm，切槽的间距为 5 mm，扫描速度均为 1 mm/s。研究不同加工时间对实验试件打孔效果的影响，时间设置在 0.5 s 到 30 s 之间，打孔间距均为 5 mm。本次实验所采用的水导激光加工系统的技术参数如表 3 所示。水导激光加工实验结束后，利用 Zeiss Vert.A1

金相显微镜测量试件加工区域的二维形貌；利用 Leica DVM6 超景深显微镜和 Bruke Contour Elite I 白光干涉仪测量试件加工区域的三维形貌。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 二维形貌

用金相显微镜将加工后的试件放大 500 倍，如图 3 所示，观察其槽和孔的二维形貌。内圈材料完全被去除的直径设为  $d_1$ ，颜色加深的材料未被去除的外圈直径设为  $d_2$ 。分别测量 12 个孔的  $d_1$  和  $d_2$  的大小。加工的槽外侧有带状的黑边，内侧黑色区域为材料被去除的区域，宽度用  $w_1$  表示，颜色变深的外侧区域材料未被去除而用  $w_2$  宽度表示。用  $d_r$  表示  $d_1$  与  $d_2$  的比值， $w_1$  表示  $w_2$  与  $w_1$  的比值，如式(1)和式(2)所示：

$$d_r = d_1 / d_2 \quad (1)$$

$$w_1 = w_1 / w_2 \quad (2)$$

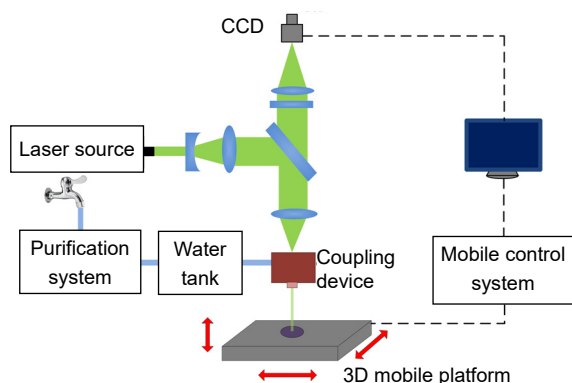


图 1 水导激光加工系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the water-guided laser processing system

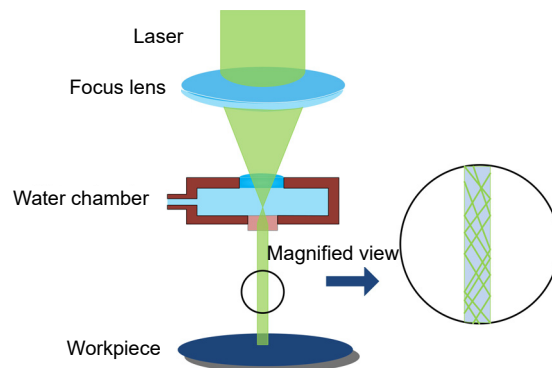


图 2 水导激光加工技术原理<sup>[15]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of the water guide laser<sup>[15]</sup>

表 3 水导激光加工系统的技术参数

Table 3 Technical parameters of the water-jet guided laser system

Technical parameters	Value
Laser energy/W	21
Laser wavelength/nm	532
Laser frequency/kHz	32.7
Water pressure/MPa	5
Nozzle diameter/ $\mu\text{m}$	100
Cutting speed/( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1
Water beam length at the cutting position/mm	15

### 3.2 三维形貌

图 4 是用超景深显微镜观察加工次数为 80 次的槽的二维形貌。图 5(a)是用白光干涉仪测得的三维形貌，可以看出，在槽两侧的最边缘位置，呈亮红色，证明其高于未加工平面，这是因为加工时的熔渣在水流的冲刷下未完全排出，而最终堆积在边缘上，形成沉积层。图 5(b)是利用测量数据绘制的切槽截面的二维轮廓，其形状呈倒梯形，是因为水射流包裹激光，水柱

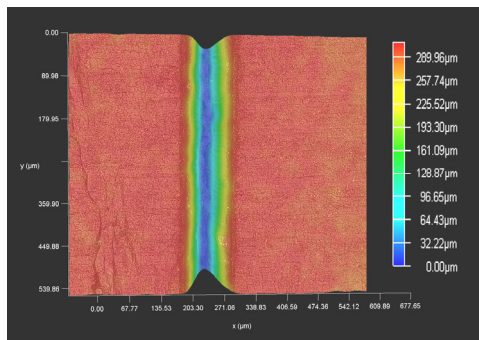


图 4 切槽二维形貌

Fig. 4 2D topography of the groove

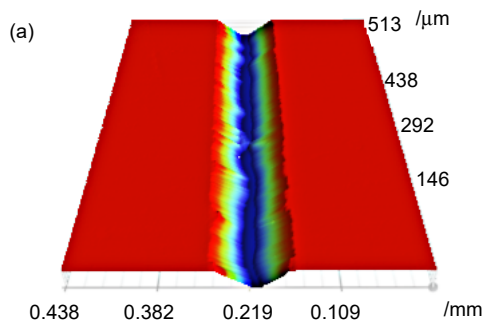


图 5 切槽三维形貌测量。(a) 三维形貌；(b) 切槽截面的二维轮廓

Fig. 5 3D shape measurement of the groove. (a) 3D topography; (b) 2D profile of the groove section

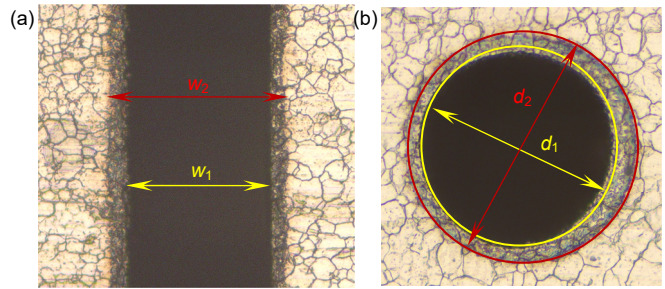


图 3 显微镜测量二维形貌。

(a) 切槽的二维形貌；(b) 孔的二维形貌

Fig. 3 Microscope measurement of 2D morphology.

(a) 2D topography of the notch; (b) 2D topography of the hole

中间位置的激光能量密度最大，材料更容易融化，而水射流外侧的激光能量密度小，不易达到材料的融化温度。还可以看出，切槽的侧壁上，垂直于进给方向有彩色的长条纹，分析原因为水柱到达底部后向斜上方喷出，冲刷熔融物，形成一个个带状条纹。

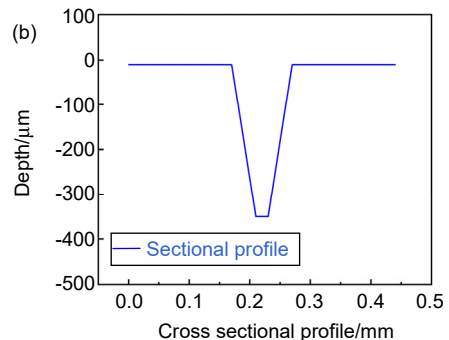
### 3.3 沉积层

图 6(a)是  $d_1$  和  $d_2$  随加工时间变化的曲线图，可以看出，内圆的直径  $d_1$  在  $105\ \mu\text{m}$  上下波动， $d_2$  在  $132\ \mu\text{m}$  上下波动，忽略测量误差的影响，波动幅度均较小，可以认为直径  $d_1$  和  $d_2$  不随加工时间的长短而改变。通过对测量结果的分析，认为切缝和孔边缘的深色区域为熔融物来不及冲走而又迅速冷却附着在加工材料表面上的沉积层。图 6(b)和 6(c)中可以看出，随着加工时间和加工次数的增加， $d_r$  不变， $w_1$  不变。综合图 6 可得：沉积层的大小不随加工时间和加工次数变化。

沉积层宽度  $d$  可用式(3)表示：

$$d = \frac{d_2 - d_1}{2} \quad (3)$$

代入数据得沉积层宽度为  $d=13.5\ \mu\text{m}$ 。





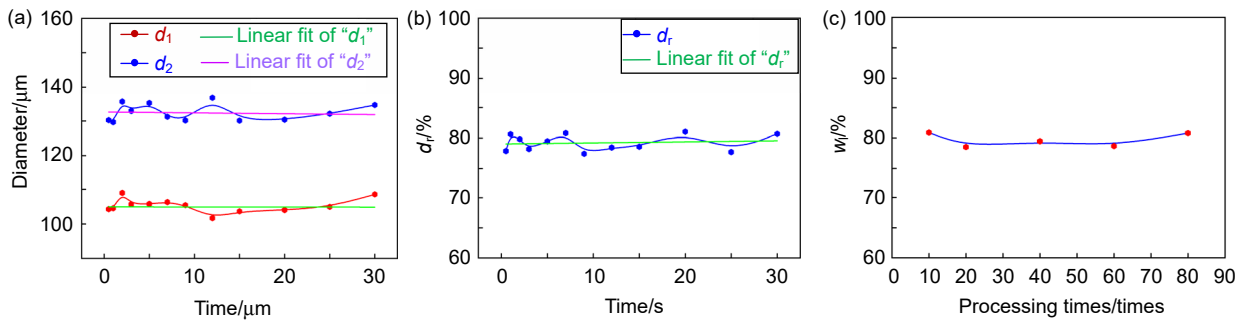


图 6 沉积层测量。(a)  $d_1$  和  $d_2$  随时间变化曲线; (b)  $d_1$  随时间变化曲线; (c)  $w_1$  随加工次数变化曲线

Fig. 6 Recast layer measurement.

(a)  $d_1$  and  $d_2$  curves with time; (b)  $d_1$  curve with time; (c)  $w_1$  curve with the number of processing times

### 3.4 讨论

水导激光加工次数对槽深的影响如图 7 所示, 从图中可知: 随着加工次数增多, 槽的深度增加, 且趋势近似为线性。切割过程大致为: 激光在水射流的包裹下到达加工试件表面, 高能激光使光斑覆盖区域的金属熔化, 水射流迅速将熔融物质冲走。三维平台始终保持匀速向前移动, 激光能量进一步熔融材料, 最终在试件上形成一个切槽。孔的加工过程与槽的加工类似, 唯一不同的是加工孔时工件坐标保持不动。

水导激光加工时间对孔深的影响如图 8 所示, 从图中可知: 孔深随时间的增加而变大。由于射流在进入喷嘴时, 喷嘴入口的拐角越尖锐, 流动越容易分离, 从而越容易发生缩流现象。理论上靠近水喷嘴处的水柱的直径约为喷嘴孔径的 83%<sup>[16]</sup>, 本实验所用的水喷嘴直径为 100  $\mu\text{m}$ , 因此喷嘴孔处水柱的理论直径约为 83  $\mu\text{m}$ 。而经水导激光加工实验后, 孔径  $d_1$  平均值为 107  $\mu\text{m}$ , 槽宽  $w_1$  平均值为 94  $\mu\text{m}$ ; 与喷嘴孔处水柱的理论直径 83  $\mu\text{m}$  相比, 加工后的孔径和槽宽均增加且增加值恒定。

316L 不锈钢试件中热的传播主要以热传导为主,

试件中的不平衡的温度场使得热量从高温区向低温区传播, 其导热过程为三维非稳态导热, 使得切缝边缘的温度值也达到了材料的熔点, 切缝边缘材料融化被水射流冲走。因此, 槽宽和孔径均比喷嘴孔处水柱的理论直径要大。

此外, 由于高速水射流在空气中喷出会受到空气剪切力的影响, 使得层流水射流受到扰动, 扰动的振幅变大最终会导致水射流破碎成水滴, 因而光束在传播过程中的全反射会受到干扰, 使得辐照在试件表面的激光光斑直径大于喷嘴孔处水柱的理论直径。

根据 Rayleigh 所研究的水射流破碎理论, 引入表征水射流稳定性的无量纲数  $Z$ <sup>[17]</sup>。

$$Z = \frac{\mu_1}{\sqrt{\rho_1 \sigma d}} = We_1^{1/2} Re_1^{-1} \quad (4)$$

$Z$  值表征水射流的稳定性, 其值与雷诺数  $Re_1$  和韦伯数  $We_1$  有关。

$$We_1 = \frac{v^2 d_1 \rho}{\sigma} = \frac{(v_1 - v_2)^2 d_j \rho}{\sigma} \quad (5)$$

$$Re_1 = \frac{\rho v_1 d_j}{\mu} \quad (6)$$

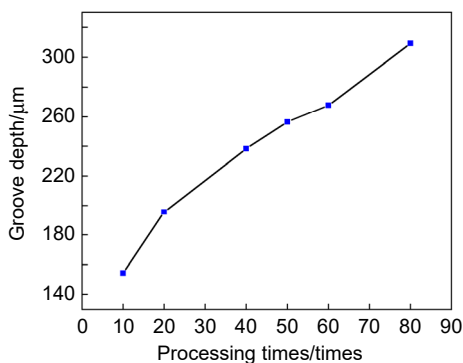


图 7 加工次数对槽深的影响

Fig. 7 Effect of processing times on the groove depth

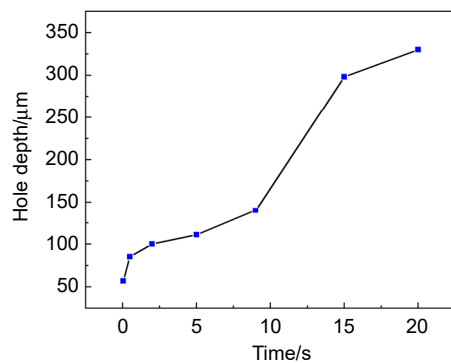


图 8 加工时间对孔深的影响

Fig. 8 Effect of time on the hole depth

式中： $v_1$ 为水的流速， $v_2$ 为空气速度， $\rho$ 为水的密度， $\sigma$ 为水的表面张力系数， $\mu$ 为动力黏性系数， $d_j$ 喷嘴出口的射流直径。

本次实验中水压为定值，故水射流的流速也为定值，且其他与雷诺数和韦伯数相关的量均为常量，因此 $Z$ 值恒定。所以水射流的稳定性不会变化，激光落在材料表面的光斑直径也就恒定不变，因此槽宽和孔径均为恒定值。

另外，从实验数据中可以看出， $d_1$ 的平均值(107  $\mu\text{m}$ )大于 $w_1$ 的平均值(94  $\mu\text{m}$ )。相比于孔的加工，加工槽时水更易于注入和排出，因而加工区域的冷却效果更好，熔融直径更小，从而使得槽宽小于喷嘴孔径。

## 4 结 论

本文以 316L 不锈钢薄片为实验试件，通过改变加工次数和加工时间两个工艺参数对实验试件进行了切槽和打孔实验，重点分析了各工艺参数对试件二维形貌、三维形貌和沉积层的影响，并对其形成机理进行了讨论，所得实验结论可为水导激光加工工艺参数的优化提供理论指导。

1) 无论是对试件进行切槽还是打孔实验，均会在加工区域产生一定宽度的沉积层，且沉积层的大小不随加工时间和加工次数变化。

2) 通过观察试件加工区域的二维形貌，打孔试件的 $d_r$ 和切槽试件的 $w_1$ 也不随加工时间和加工次数变化。

3) 由于受激光束能量分布的影响，通过观察切槽试件加工区域的三维形貌，其截面呈倒梯形。

## 参考文献

- [1] Wang Z, Yang Z N, Zhang Z, et al. Progress in film hole processing method for single crystal turbine blades of aeroengine[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, **39**(8): 838–842.  
王祯, 杨泽南, 张朕, 等. 单晶涡轮叶片气膜孔加工技术及其发展[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, **39**(8): 838–842.
- [2] Jiao Y, He B, Li P, et al. Development of micro-holes machining with high-aspect ratio[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2018, **29**(3): 1–7.  
焦悦, 贺斌, 李朋, 等. 大深径比微孔加工技术及其发展[J]. *航空科学技术*, 2018, **29**(3): 1–7.
- [3] Lian F, Zhang H C. Technology and development of Ti alloy machined by EDM[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2012(2): 18–23.  
连峰, 张会臣. 钛合金的电火花加工技术及最新研究进展[J]. *现代制造工程*, 2012(2): 18–23.
- [4] Sheng P, Chryssolouris G. Investigation of acoustic sensing for laser machining processes Part 2: laser grooving and cutting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, **43**(2–4): 145–163.
- [5] Chen C, Gao M, Gu Y Z, et al. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(6): 0603004.  
陈聪, 高明, 顾云泽, 等. 光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究[J]. *中国激光*, 2014, **41**(6): 0603004.
- [6] Weiss L, Aillerie M, Tazibt A, et al. Surface oxidation and phase transformation of the stainless steel by hybrid laser-waterjet impact[J]. *Materials Research Express*, 2014, **1**(3): 036501.
- [7] Sun B Y, Qiao H C, Zhao J B, et al. Current status of water-jet guided laser cutting technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(11): 1039–1044.  
孙博宇, 乔红超, 赵吉宾, 等. 水导激光切割技术研究现状[J]. *光电工程*, 2017, **44**(11): 1039–1044.
- [8] Li C Q, Yang L J, Wang Y. A research on surface morphology of cutting of titanium sheet with water-jet guided laser and conventional laser[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, **120**: 366–370.
- [9] Li C Q, Yang L J, Wang Y. Experimental study on water-jet guided laser machining magnesium alloy[J]. *Materials Science Forum*, 2012, **723**: 476–480.
- [10] Li L, Wang Y, Yang L J, et al. Experimental research on water-jet guided laser processing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6595**: 659525.
- [11] Sun D, Wang J H, Han F Z. Contrastive study of water jet guided laser and water jet assisted laser cutting of monocrystalline silicon[J]. *Applied Laser*, 2016, **36**(6): 723–727.  
孙冬, 王军华, 韩福柱. 单晶硅水导/水辅助激光切割加工对比研究[J]. *应用激光*, 2016, **36**(6): 723–727.
- [12] Rashed C A A, Romoli L, Tantussi F, et al. Water jet guided laser as an alternative to EDM for micro-drilling of fuel injector nozzles: a comparison of machined surfaces[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2013, **15**(4): 524–532.
- [13] Zou Y, Sang Z K, Li D L, et al. Multi-objective optimal design of enhancing technology for 304 stainless steel by water jet peening[J]. *Surface Technology*, 2018, **47**(2): 25–29.  
邹云, 桑振宽, 李大磊, 等. 304 不锈钢水射流强化工艺的多目标优化设计[J]. *表面技术*, 2018, **47**(2): 25–29.
- [14] Jiang K J, Wang L, Zhang Q L, et al. Laser annealing and softening process of 316L stainless steel[J]. *Surface Technology*, 2019, **48**(2): 10–16.  
蒋可静, 王梁, 张群莉, 等. 316L 不锈钢激光瞬时退火软化工艺研究[J]. *表面技术*, 2019, **48**(2): 10–16.
- [15] Perrotet D, Housh R, Richerzhagen B, et al. Heat damage-free laser-microjet cutting achieves highest die fracture strength[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5713**: 285–292.
- [16] Porter J A, Louhisalmi Y A, Karjalainen J A, et al. Cutting thin sheet metal with a water jet guided laser using various cutting distances, feed speeds and angles of incidence[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, **33**(9–10): 961–967.
- [17] Wei M R. Investigation on the stability of capillary waterjet influenced by cavitation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 3–4.  
魏美容. 空化对毛细管水射流稳定性的影响研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 3–4.

# Effect of water-guided laser machining technology on micro-morphology of 316L stainless steel

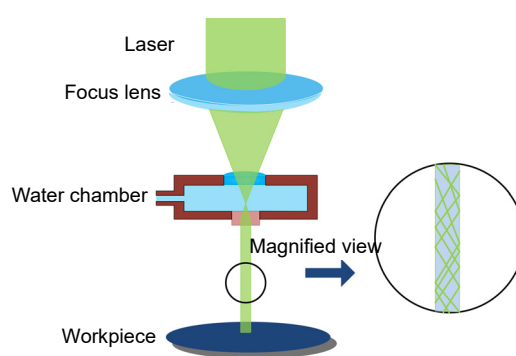
Yu Yongfei<sup>1,2,3</sup>, Qiao Hongchao<sup>1,3\*</sup>, Cao Zhihe<sup>1,3</sup>, Zhao Jibin<sup>1,3\*</sup>, Zhang Yinuo<sup>1,3,4</sup>, Wu Jiajun<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

<sup>3</sup>Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110169, China;

<sup>4</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



Schematic diagram of water guide laser

**Overview:** With the increasing of the thrust & thrust weight ratio of aircraft engines, the operating temperature of aero-engine hot components can be reached above 1400 K. In order to ensure the normal working of blades at an extremely high temperature environment, the ceramic/metal gradient thermal barrier coatings and design of gas film cooling holes are selected in general. However, the process for gas film cooling holes of aero-engines has encountered a major challenge due to its complex material structures. Laser machining (LM) and electrical discharge machining (EDM) are usually used for machining gas film cooling holes. The LM technology utilizes the laser thermal effect, so this method has disadvantages of thick molten layer, micro-cracks, laser ablation, etc. Thus, the EDM is selected because it can reduce the thickness of the molten layer. However, EDM cannot guarantee the processing accuracy and the recrystallization would be occurred during the processing, which will affect the serve life of aircraft engines. In addition, the EDM is only applicable to metallic materials. In recent years, ceramic materials have been widely used in the aerospace field. The above two methods are unable to meet processing requirements gradually. Water-guided laser machining (WGLM) is a novel method by using water beam fibers to guide the laser to machine the work-piece surface, which can solve these problems. It has been widely applied in the precise machining field of aerospace, bio-medical, micro-electromechanical, and so on, due to advantages of almost no micro-cracks, small heat-affected zone, pollution-free, less recast layer, high processing accuracy, parallel cuffing, etc. This work aims to investigate the effect of different WGLM parameters on the micro-morphology of materials and the mechanism between lasers and materials. The experiments for slotting and grooving 316L stainless steel thin samples were used by the WGLM system developed by our research group. The 2D micro-topography after experiments were tested by the Zeiss Vert. A1 metalloscope, and the 3D micro-topography of samples after experiments were tested by the Leica DVM6 optical microscope with the large depth of field & Bruke Contour Elite I white-light interferometer. Experimental results show that a certain width deposition layer can be occurred in the machining region, and the width of deposition layer does not change with the parameter of the machining time and the number of machining times. From the 2D micro-topography of the machining region of samples, it can be found that the ' $d_r$ ' of slotting samples and the ' $w_l$ ' of grooving samples also do not change with the machining parameters. From the 3D micro-topography of the machining region of grooving samples, it can be found that the cross-section shape is inverted trapezoid.

**Citation:** Yu Y F, Qiao H C, Cao Z H, *et al.* Effect of water-guided laser machining technology on micro-morphology of 316L stainless steel[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(11): 190654

Supported by NSFC-Liaoning Province United Foundation (U1608259) and National Natural Science Foundation of China (51875558)

\* E-mail: hcqiao@sia.cn; jbzhaos@sia.cn