

水射流辅助激光加工碳化硅的影响研究

陈雪辉*, 李翔, 吴超, 张遥

安徽建筑大学机电学院, 安徽 合肥 230601

摘要 为了研究具有一定速度和角度的水射流在水射流辅助激光加工碳化硅材料中对加工槽体深度、宽度、热影响区的影响,利用 Fluent 软件,分别以不同速度和不同入射角度的水射流对材料表面冲击力大小的影响进行模拟,从理论上分析冲击力对加工结果的影响,同时进行相关实验验证。结果表明,水射流速度相同时,随着射流入射角度增加,其对槽体表面的冲击力逐渐增大。与无水激光加工相比,水射流辅助激光加工对所得槽体的深度影响较大,对宽度影响很小或基本无影响,热影响区显著降低,槽体底部和槽口处存在较少熔渣和重凝层,加工质量较好。

关键词 激光光学; 激光加工; 水射流; 碳化硅; 槽体

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.011405

Influence of Water Jet Assisted Laser Processing Silicon Carbide

Chen Xuehui*, Li Xiang, Wu Chao, Zhang Yao

College of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract In order to investigate the effects of a water jet with a certain speed and angle on the depth, width and heat affected zone of the processed groove in the water jet-assisted laser machining of silicon carbide. The Fluent software is used to simulate the effect of water jets at different speeds and different angles of incidence on the surface impact of the material. The impact of impact force on processing results is theoretically analyzed. At the same time, the relevant experiments are carried out for verification. The results show that when the water jet velocity is the same, the impact force on the surface of the groove gradually increases as the incident angle of the jet increases. Compared with the waterless laser processing, the water jet assisted laser processing has a great influence on the depth of the obtained groove, the effect of the width is small, and the heat affected zone is significantly reduced. There are less slag and re-condensation layer at the bottom and notch of the groove, thus the processing quality is better.

Key words laser optics; laser processing; water jet; silicon carbide; groove

OCIS codes 140.3390; 010.7340

1 引言

碳化硅(SiC)属于工程陶瓷材料,具有耐高温、硬度高、热膨胀系数小、抗氧化、耐化学腐蚀等性能,以及高强度、耐腐蚀、抗磨损等优点^[1]。因此,工程陶瓷已逐渐应用于化工、冶金、机械、电子、能源及尖端科学技术领域,并占有十分重要的地位^[2]。脆性是陶瓷材料的弱点,传统的机械加工极易导致碳化硅材料迸裂,产生裂纹,影响加工质量;电子束加工虽具有无机械接触作用、加工精度高、速度快等优点,但需要在真空环境下,而且使用高电压会产生较

强 X 射线,必须采取相应的安全措施;化学加工方法可以克服碳化硅材料脆性断裂的缺点,但加工过程不容易控制,腐蚀工艺过程繁杂,加工效率低,同时还存在环境污染;激光加工效率较高,且为无接触加工,但加工过程中存在迸裂、熔渣、重铸层和热影响区等缺陷,使得加工质量较差。为了满足人们实际生产加工碳化硅材料的要求,必须找到更加全面、合适的加工方法。罗艳等^[3]采用准分子激光对碳化硅陶瓷表面进行了激光参数的辐照实验,结果表明,碳化硅表面损伤的宏观形貌与激光辐照参数相关,辐照脉冲数增加或单脉冲能量增加均会加重辐照损

收稿日期: 2018-06-27; 修回日期: 2018-07-09; 录用日期: 2018-07-24

基金项目: 安徽省高校自然科学基金重点项目(KJ2015A013)、安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZD2016153)

* E-mail: xhenxh@163.com

伤,增大激光重复频率会导致辐照损伤深度略微下降。张寰臻等^[4]研究了在高压辅助气体作用下运用纳秒脉冲激光刻蚀碳化硅陶瓷颗粒增强 Al 基复合材料的可行性,结果表明,刻蚀深度随激光能量的增加而增大,重凝层厚度和表面粗糙度随激光能量的增加而增加,并呈饱和趋势。

液体辅助激光复合加工是近几年发展的一种激光复合加工方法,在对硬脆性材料进行加工时,液体辅助激光加工可以降低加工处的温度梯度,避免由于温度梯度导致材料迸裂、热影响区等问题,进而改善加工质量。孙冬等^[5]对比研究了水辅助切割和水导切割单晶硅,保持激光加工工艺参数与水射流参数相同加工单晶硅,结果表明,水导激光加工所得槽体熔渣少,热影响区较小,但水导激光加工需要价格昂贵的耦合装置。陈雪辉等^[6]研究激光加工参数和射流加工参数对 Al_2O_3 陶瓷材料的激光复合刻蚀量和截面质量的影响,实验结果表明,水射流辅助激光刻蚀加工可以清除加工时产生的熔渣,降低材料表面粗糙度,使得加工出的盲孔成为较为规则的倒三角形。孙树峰等^[7]采用水辅助激光诱导等离子体背面刻蚀的方法对 Pyrex7740 玻璃进行了加工,解决了传统加工中精度低、易引入污染杂质和加工效率低等问题,得到刻蚀边缘齐整、无明显的崩边、底面质量好的加工结果。Mullick 等^[8]研究了水射流辅助激光加工中激光能量损失模型,发现 40%~50% 的激光能量损失来自于水的汽化;逢志伟^[9]通过实验以及模拟研究了激光参数以及水射流参数对水射流辅助激光刻蚀的影响规律;孔令瑞等^[10]进行了水辅助激光刻蚀实验,研究表明,表面质量、加工效率明显提高,水的冷却作用和空泡效应提高了刻蚀质量;Tangwarodomnukun 等^[11]研究了一种混合激光-水射流微细加工技术,对比研究了传统激光加工技术与激光复合加工技术切割硅材料所得的表面形貌,分析了不同工艺参数对热影响区和加工质量的影响;马颖辉等^[12]基于计算流体动力学(CFD)分析软件 Fluent,针对含纳米颗粒固液二相冲击射流提出了一个新的基于等效黏度的多相流模型,并在不同纳米颗粒浓度下与不考虑固液相间相互作用的离散相模型(DPM)和考虑固液相间相互作用的 DPM 进行了对比;衣正尧等^[13]建立纯水射流的数学模型,模拟了其冲击速度场,发现射流压力对冲击性能有较大影响。虽然前人已经做了较多的工作,从不同的研究方面降低激光加工中存在的热

影响区、重凝层等不良影响,但对水射流辅助激光加工碳化硅材料时水射流角度和水射流速度对碳化硅加工结果的影响研究较少。本文在前人的研究基础上,对不同水射流角度和不同水速对碳化硅加工的深度、宽度、热影响区和表面形貌的影响进行研究。

2 射流冲击过程模拟和理论分析

2.1 射流冲击过程模拟

为了研究不同水速和不同角度下的水射流对材料表面冲击力的影响,利用 Fluent 软件分别进行模拟。图 1、2 分别是水射流入射角为 30° 、 60° ,速度为 $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的压力和速度分布云图和壁面横向中心线压强图。

从图 1 和 2 可以看出,射流速度相同, 60° 的射流入射角度冲击到材料表面时的作用区域大于 30° 的射流入射角度冲击到材料表面时的作用区域,且 60° 的射流入射角产生的冲击作用中心区域的最大压力值约为 30° 的射流入射角冲击作用中心区域最大压力值的 2 倍; 60° 的水射流冲击材料表面时的速度大于 30° 的水射冲击材料表面时的速度,这是由于水束从喷嘴出来到材料表面存在一定喷距, 30° 的水射流在喷嘴内部产生的空化程度比 60° 的水射流在喷嘴内部产生空化程度较大,且水束较发散,导致水束作用于材料表面时速度降低;射流入射角度不同, 60° 射流入射角度作用于材料表面时其速度分布在材料表面左右两侧趋于均匀,而 30° 射流入射角度作用于材料表面时其速度分布在材料左侧。图 1 (b) 中,取横向中心线位置,分别测量速度云图发散距离,可以看出, 60° 的水射流速度云图中发散距离小于 30° 的水射流速度云图中发散距离,说明 60° 的射流入射角度较 30° 射流入射角度更有利于水束集中;也说明在相同初始速度下, 60° 的入射角度到达材料表面的速度大于 30° 的入射角度到达材料表面的速度。从横向中心线压强分布曲线图可以看出, 30° 的入射角作用于材料表面时,其中心区域压强最大值约为 1.15 kPa ; 60° 的入射角作用于材料表面时,其中心区域压强最大值约为 2.30 kPa 。从图 2 可以看出, 60° 的射流入射角冲击材料时,作用于材料表面的压强值较大,其冲击作用更强,且作用区域较集中,更有利于射流动能的利用,所以从材料去除的冲击力考虑可得出, 60° 的水射流角度优于 30° 的水射流角度。

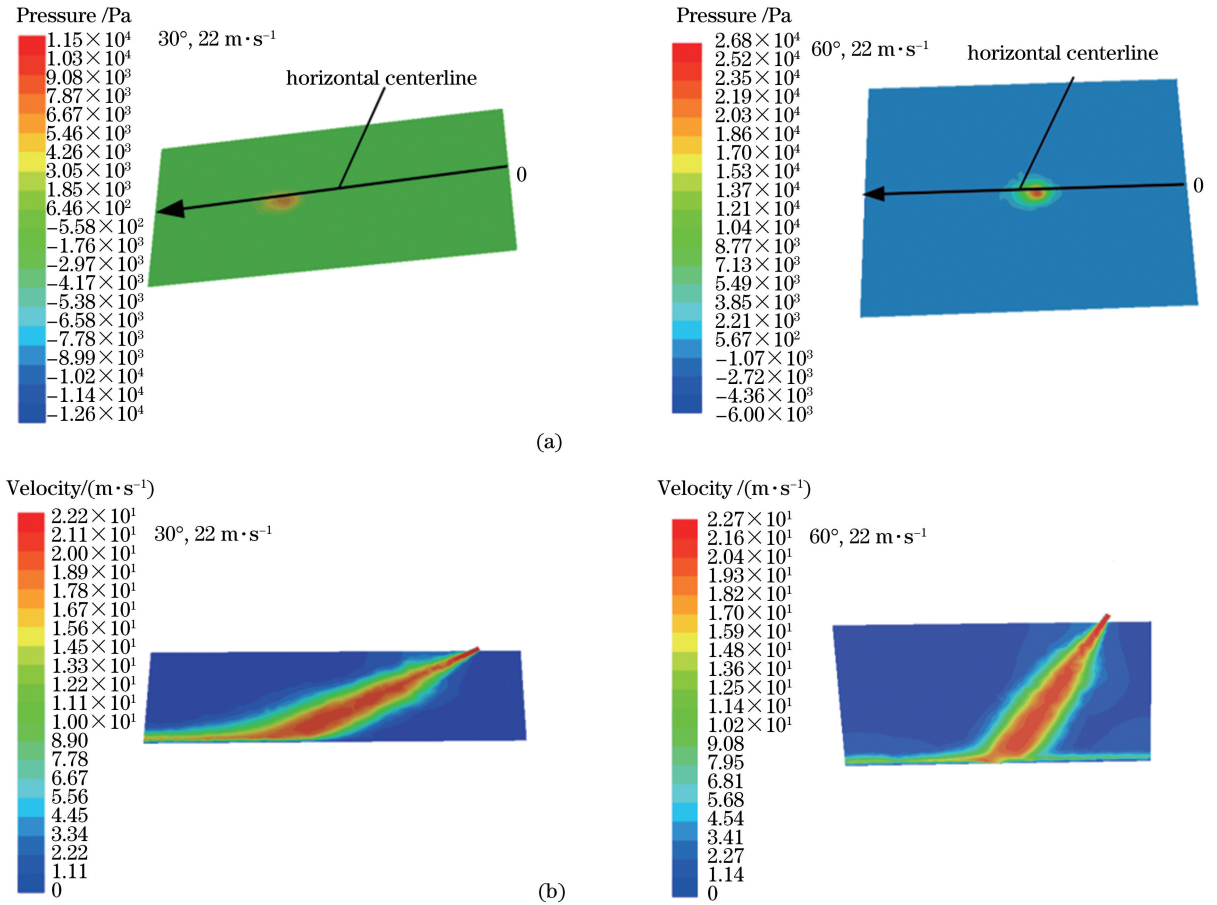


图 1 30°和 60°射流入射角时 22 m·s⁻¹ 速度下的(a)压强和(b)速度分布云图

Fig. 1 Distribution cloud diagrams of (a) pressure and (b) velocity at 30° and 60° jet incidence angles and 22 m·s⁻¹ velocity

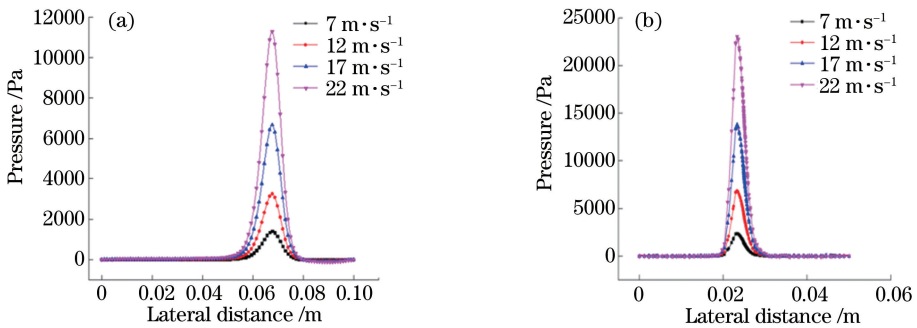


图 2 (a) 30°和(b) 60°射流入射角在不同水射流速度时壁面横向中心线压强分布曲线图

Fig. 2 Pressure distribution curves of lateral centerline of wall at (a) 30° and (b) 60° jet incident angles with different water jet velocities

2.2 理论分析

一定角度的水束冲击到材料表面时会对材料产生一定的冲击力,如图 3 所示。

$$F_n = F \sin \theta, \quad (1)$$

$$F_s = F \cos \theta, \quad (2)$$

式中 F 为冲击力, F_n 为垂直于材料表面力, F_s 为平行于材料表面力。

由图 3 可知,具有一定倾斜角度和速度的水射流作用于材料表面,会对材料产生一个倾斜的冲击力 F ,把冲击力 F 沿垂直于材料表面和平行于材料表面分解为 F_n 和 F_s , F_n 在实际加工中影响深度, F_s 在实际加工中影响宽度。假设水射流在不同角度速度相同时冲击在材料表面同一处,30°的射流入射角度冲击到材料表面时冲击力与 60°的射流入射角度冲击到材料表面时冲击力相同,都为 F ,分别把

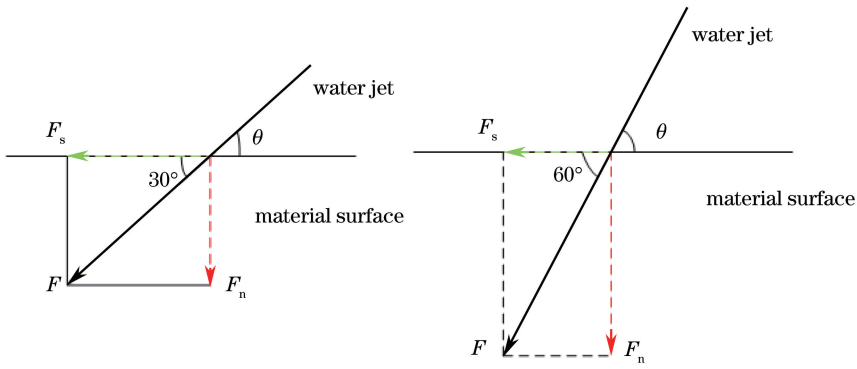


图3 不同角度的水束冲击到材料表面时对材料产生冲击力的示意图

Fig. 3 Schematic of the impact force of water jets impacted on the surface of the material at different angles

θ 等于 30° 和 60° 代入(1)式和(2)式。

$\theta = 30^\circ$ 时,

$$F_{n1} = F \sin 30^\circ = \frac{1}{2} F, \quad (3)$$

$$F_{s1} = F \cos 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} F, \quad (4)$$

$\theta = 60^\circ$ 时,

$$F_{n2} = F \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} F, \quad (5)$$

$$F_{s2} = F \cos 60^\circ = \frac{1}{2} F. \quad (6)$$

从(3)~(6)式可以看出, $F_{n1} < F_{n2}$, $F_{s1} > F_{s2}$ 。在相同射流速度时, 30° 的射流入射角度加工出的槽体的深度小于 60° 的射流入射角度加工出的槽体的深度; 30° 的射流入射角度加工出的槽体的宽度大于 60° 的射流入射角度加工出的槽体的宽度。从图1可以得出, 射流速度相同时, 60° 的射流入射角度作用于材料表面时产生的冲击压强约为 30° 的射流入射角度作用于材料表面时产生的冲击压强的2倍,

所以冲击力 $F' = 2F$, 重新代入(5)式和(6)式可得:

$$F_{n2'} = 2F \sin 60^\circ = \sqrt{3} F, \quad (7)$$

$$F_{s2'} = 2F \cos 60^\circ = F. \quad (8)$$

从(7)和(8)式可以看出, $F_{n1} < F_{n2'}$, $F_{s1} < F_{s2'}$ 。在相同射流速度时, 30° 的射流入射角度加工出的槽体的深度小于 60° 的射流入射角度加工出的槽体的深度, 30° 的射流入射角度加工出的槽体的宽度小于 60° 的射流入射角度加工出的槽体的宽度。

3 实验验证和分析

为研究无水激光加工和水辅助激光加工对加工所得槽体深度、宽度和热影响区三个方面的影响, 需要确定一组激光参数保持不变, 如表1所示, 在实际加工中, 采用 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的碳化硅材料作为试样, 同时水射流稍滞后于激光束 1 mm 的位置作用于加工区域, 可以避免水射流与激光束直接接触, 造成过多的激光能量损失, 以 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的碳化硅材料作为试样。

表1 激光加工工艺参数表

Table 1 Parameters of laser processing

Parameter	Repetition frequency /Hz	Electricity /A	Pulse width /ms	Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
Value	25	100	0.8	2

在表1的激光参数下, 分别以 30° 、 60° 的水射流入射角和 7 、 12 、 17 、 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的射流速度及无水情况下加工, 结果如图4、5所示。

为了更好地观察无水情况下, 激光加工碳化硅材料和相同水射流速度下, 不同水射流入射角度对水射流辅助激光加工碳化硅槽体的影响, 取水射流速度为 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 不同射流入射角度辅助激光加工所得槽体微观形貌如图6所示。

结合图4~6可以看出, 与无水辅助激光加工相比, 水辅助激光加工结果优于无水加工。分析认为

无水辅助激光加工时, 激光直接作用于材料表面, 材料受热加热, 瞬时达到材料熔点, 在辅助气体作用下将材料吹除, 然而辅助气体的吹除能力有限, 已经融化的材料会重新凝固, 加工槽体两侧和槽口处存在熔渣和重凝层, 且热影响区较大, 加工质量较差; 水辅助激光加工材料时, 具有一定速度的水会对材料产生冲击力, 且随着水速增加, 这种冲击力增加较明显, 能够及时地将激光加工后熔化和未来得及重新凝固的材料及时冲刷走, 加工槽体两侧和槽口处熔渣和重凝层较少, 加工质量较好; 60° 的射流入射角

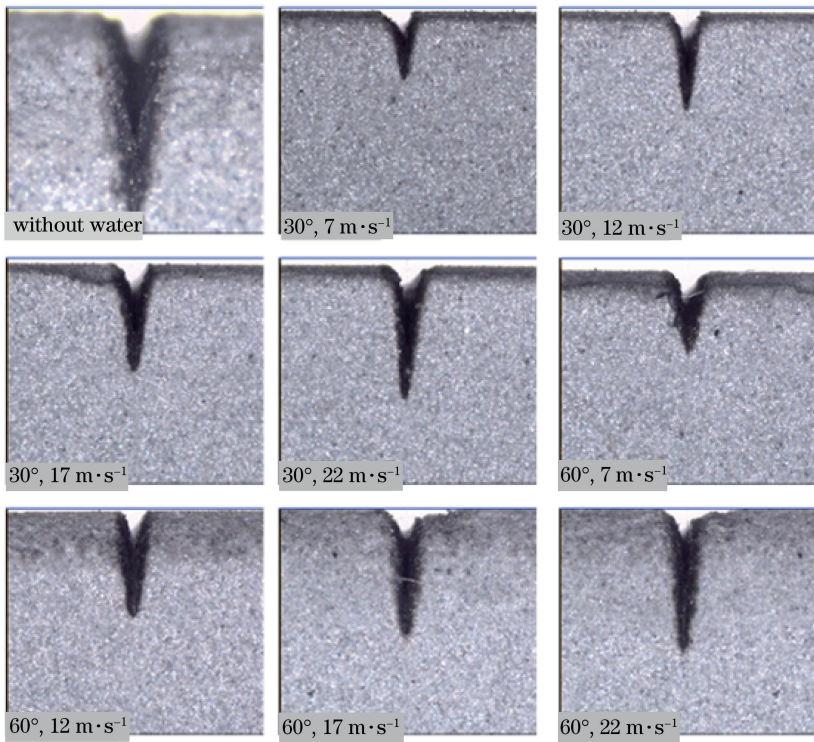


图 4 无水、30°和 60°射流入射角在不同速度下实验深度结果图(×30)

Fig. 4 Results of test depth at different speeds for waterless, 30° and 60° jet injection angles (×30)

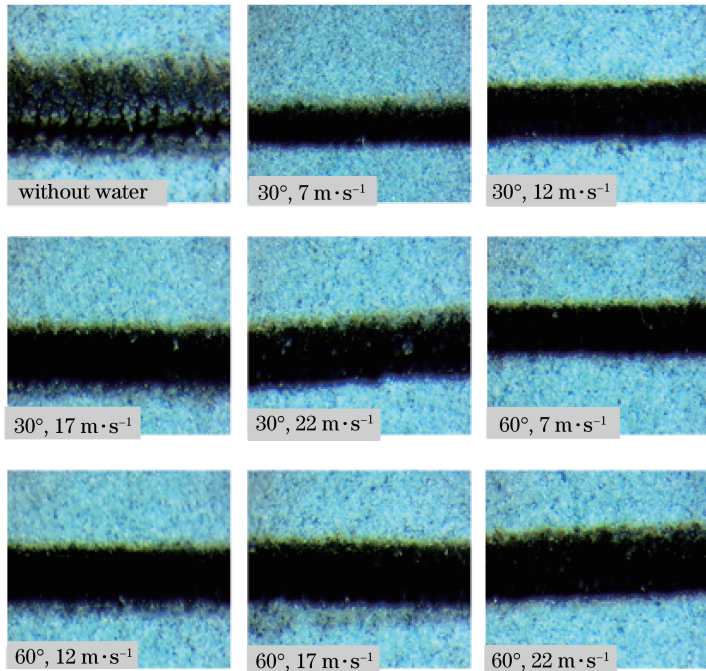


图 5 无水、30°和 60°射流入射角在不同速度下实验宽度结果图(×40)

Fig. 5 Test width results at different speeds for waterless, 30° and 60° jet injection angles (×40)

度对槽体和槽口的熔渣和重凝层冲刷效果优于 30° 的射流入射角度对槽体和槽口的熔渣和重凝层冲刷效果。水辅助激光加工时,材料表面会覆盖一层薄而流动的水层,由于水的存在对激光能量有一定的吸收作用,降低激光直接作用于材料的能量,同时加

强激光热能与周围介质,包括水之间的对流换热,降低热影响区。从图 6 微观形貌可以明显看出,无水加工时槽体两侧和底部存留较多熔渣颗粒,30°的射流入射角度辅助激光加工所得槽体和槽体底部仍存在有部分熔渣颗粒,而 60°的射流入射角度辅助激光

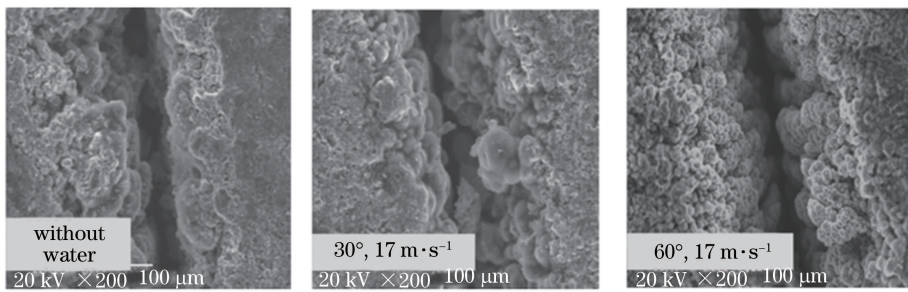


图6 无水、30°和60°射流入射角在 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下实验表面形貌图

Fig. 6 Test surface topographies of waterless, 30° and 60° jet injection angles at $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

加工所得槽体和槽体底部基本无熔渣颗粒。在相同射流入射角度下,射流速度增加,槽体深度逐渐增加,宽度变化不明显,表面形貌逐渐改善。

在相同水射流速度下,随着射流入射角度增加,槽体深度逐渐增加。结合(3)、(4)、(7)和(8)式可以看出, $F_{n1} < F_{n2}$ ($F_{s1} = 0.5F$, $F_{s2} = 1.7F$, $F_{s2} \approx 3F_{s1}$)。30°的射流入射角度对材料的垂直作用力小于60°的射流入射角度对材料的垂直作用力,即30°的射流入射角度加工出的槽体的深度小于60°的射流入射角度加工出的槽体的深度,实验结果与理论分析相符合。槽体宽度增加趋势不明显,这是因为 $F_{s1} < F_{s2'}$ ($F_{s1} = 0.85F \approx F_{s2'} = 1F$),即30°的射流入射角度对材料的水平作用力小于60°的射流入射角度对材料的水平作用力,理论上,30°的射流入射角度加工出的槽体的宽度应该小于60°的射流入射角度加工出的槽体的宽度,但在实际加工中,30°的射流入射角度加工出的槽体的宽度与60°的射流入射角度加工出的槽体的宽度差别不大,宽度变化不明显。这是因为在实际加工中,激光作用于材料表面,使材料瞬时达到材料熔点,在辅助气体作用下,将熔化材料吹除,此时激光热能与周围空气的对流换热不强,但由于水的加入,不仅会反射激光,还加强了激光热能与周围介质尤其是水之间的对流换热,降低了激光能量。从图1的速度仿真云图可以看出,30°的射流入射角度作用于材料表面时,其速度分布在材料表面左侧,右侧几乎没有;60°的射流入射角度作用于材料表面时,其速度分布在材料表面左右两侧趋于均匀,在材料表面处分散激光能量略大于30°的射流入射角度作用于材料表面时的激光能量,也就影响了激光能量对槽体宽度的影响。

4 结 论

相比无水激光加工,水射流辅助激光加工的槽体两侧和槽口处的熔渣和重凝层存在量减小或基本

不存在,热影响区降低,加工槽的质量较好。水射流具有一定的冲击和冷却作用,能够及时把激光作用后的熔化材料冲走,降低槽体两侧和槽口处的熔渣和重凝层存在量,降低热影响区。

水射流入射角度一定时,随着水速增加,槽体深度逐渐增加;水射流速度相同时,60°的射流入射角度辅助激光加工得到的槽体深度大于30°的射流入射角度辅助激光加工得到的槽体深度,而对槽体宽度的影响较小,能够得到较好的槽体加工质量。

参 考 文 献

- [1] Yu W C, Hu X B, Cui Y X, *et al.* Laser ablation of 6H-SiC single crystals and spectral characterization [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36 (4): 1255-1260.
郁万成, 胡小波, 崔漾心, 等. 6H-SiC 单晶的激光刻蚀及光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36 (4): 1255-1260.
- [2] Maboudian R, Carraro C, Senesky D G, *et al.* Advances in silicon carbide science and technology at the micro- and nanoscales [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2013, 31(5): 050805.
- [3] Luo Y, Wu X B, Zhou Y, *et al.* Interaction between excimer laser and SiC ceramic [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 121403.
罗艳, 吴晓斌, 周翊, 等. 准分子激光与SiC陶瓷的相互作用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53 (12): 121403.
- [4] Zhang H Z, Huang T, Xiao R S. Nanosecond pulsed fiber laser ablation of SiC_p/Al composite materials [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (1): 0102017.
张寰臻, 黄婷, 肖荣诗. SiC_p/Al 复合材料纳秒脉冲光纤激光刻蚀[J]. 中国激光, 2017, 44 (1): 0102017.

- [5] Sun D, Wang J H, Han F Z. Contrastivestudy 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.
- [6] Chen X H, Yuan G F, Zheng W. Experimental investigation of water jet-assisted laser etching on Al_2O_3 ceramics [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(12): 1568-1571.
陈雪辉, 袁根福, 郑伟. 水射流辅助激光刻蚀 Al_2O_3 陶瓷的试验研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(12): 1568-1571.
- [7] Sun S F, Shao Y. Water-assisted laser induced plasma backside etching of pyrex7740 glass [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101404.
孙树峰, 邵勇. 水辅助激光诱导等离子体背部刻蚀 Pyrex7740 玻璃[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101404.
- [8] Mullick S, Madhukar Y K, Roy S, *et al.* An investigation of energy loss mechanisms in water-jet assisted underwater laser cutting process using an analytical model[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 91: 62-75.
- [9] Zhai Z W. Experimental study and numerical simulation of low-pressure jet-assisted laser etching [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
逢志伟. 低压射流辅助激光刻蚀实验研究与数值模拟[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- [10] Kong L R, Zhang F, Duan J, *et al.* Research on water-assisted laser etching of alumina ceramics [J]. Laser Technology, 2014, 38 (3): 330-334.
孔令瑞, 张菲, 段军, 等. 水辅助激光刻蚀氧化铝陶瓷的研究[J]. 激光技术, 2014, 38(3): 330-334.
- [11] Tangwarodomnukun V, Wang J, Huang C Z, *et al.* An investigation of hybrid laser-waterjet ablation of silicon substrates [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 56: 39-49.
- [12] Ma Y H, Jiang F, Xu X F. Study on numerical calculation models for solid-liquid two-phase impinging jet with nanoparticles [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 031601.
马颖辉, 姜芳, 徐学锋. 纳米颗粒固液二相冲击射流数值计算模型研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 031601.
- [13] Yi Z Y, Wang X R, Liu F Q, *et al.* Modeling and simulation analysis for pure water jet impact based on CFD[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012, 32 (1): 54-57.
衣正尧, 王兴如, 刘富强, 等. 纯水射流冲击性能的 CFD 建模与仿真分析[J]. 液压气动与密封, 2012, 32(1): 54-57.