

高重复频率皮秒激光烧蚀不锈钢的研究

刘路^{1,2} 黄宗南² 阮亮¹ 陶俊¹ 张文武¹

¹中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201

²上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072

摘要 利用兆赫兹量级高重复频率皮秒激光对 304 不锈钢进行烧蚀,通过激光共聚焦显微镜和扫描电子显微镜对烧蚀表面进行测量观察。结果表明:单脉冲峰值能量密度和重复频率共同决定不锈钢的烧蚀率,单脉冲峰值能量密度与烧蚀阈值比值越大,烧蚀率越大;在高频低峰值能量密度下能获得更优的表面烧蚀质量。随着扫描速度的提高,烧蚀深度呈对数函数关系逐渐减小,烧蚀后的表面粗糙度先减小后趋于稳定。扫描速度在 1.0~1.7 m/s 内变化时,烧蚀率变化不大。因此采用交叉扫描路径有利于提高烧蚀后的表面质量。

关键词 激光光学; 高重复频率; 皮秒激光; 烧蚀; 峰值能量密度; 扫描速度

中图分类号 TG485 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.071404

Ablation Study of Stainless Steel by Picosecond Laser with High Repetition Rate

Liu Lu^{1,2} Huang Zongnan² Ruan Liang¹ Tao Jun¹ Zhang Wenwu¹

¹ Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315201, China

² School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract A picosecond laser with a high repetition rate of MHz is used to ablate stainless steel 304 and the surface after ablation is observed and measured by laser scanning confocal microscope (LSCM) and scanning electron microscope (SEM). The results show that the ablation rate is jointly determined by the single pulse peak fluence and the repetition rate. The ablation rate increases as the ratio of pulse peak fluence to ablation threshold increases. Better ablation quality of surfaces can be achieved under the conditions of lower peak fluence and higher repetition rate. With the increment of scanning speed, the ablation depth decreases logarithmically, and the roughness degree of ablation surface decreases first and then stabilizes. When the scanning speed is between 1.0 m/s and 1.7 m/s, the ablation rate shows no obvious change. The use of cross scanning path is beneficial for improving the surface quality after ablation.

Key words laser optics; high repetition frequency; picosecond laser; ablation; peak fluence; scanning speed

OCIS codes 140.3330; 140.3390; 140.3440

1 引言

相较于脉宽为毫秒、纳秒量级的长脉冲激光,超短脉冲激光作用在材料上时产生的小热载荷特性可保证加工质量的准确性和可靠性^[1-2],这使得超短脉冲激光在材料加工领域具有巨大的潜力。超短脉冲激光包括飞秒激光和皮秒激光(脉宽小于等于 10 ps);和皮秒激光相比,利用飞秒激光进行材料去除可以实现更小的热影响^[3],但在金属加工时会产生非线性效应^[4],影响了加工精度。Weck 等^[5]通过研究证明了在合理的参数设置下,脉宽在 10 ps 左右的皮秒激光能获得与飞秒激光相媲美的高质量微孔,但加工效率更高。另外,

收稿日期: 2016-03-08; **收到修改稿日期:** 2016-03-28; **网络出版日期:** 2016-06-21

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(YZ201535)

作者简介: 刘路(1991—),男,硕士研究生,现主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: liulu@nimte.ac.cn

导师简介: 张文武(1969—),男,博士,高级研究员,博士生导师,主要从事激光与能量场方面的研究。

E-mail: zhangwenwu@nimte.ac.cn

飞秒激光加工系统的价格和维护成本高,限制了其在工业领域的广泛应用^[6-7]。目前,皮秒激光单脉冲能量可达几十微焦耳量级,重复频率可达兆赫兹量级,保证了皮秒激光的加工效率,促进了皮秒激光在工业上的进一步发展^[8]。

皮秒激光与物质相互作用是个极其复杂的过程,其中等离子体屏蔽和热量积累是影响激光烧蚀的两个重要因素^[9-10]。较高重复频率和脉冲能量的皮秒激光配合高速扫描振镜,可以很大程度上提高材料去除效率。同时,高频率和高能量也是产生等离子体和热量积累现象的主要原因,会影响去除材料的精度和可靠性。因此,增大激光单脉冲能量有利于提高烧蚀率,但不利于表面的加工质量。Chichkov 等^[11]研究发现飞秒和皮秒激光在 $200\sim 600\text{ mJ/cm}^2$ 低能量密度下的加工质量要优于 $600\sim 6000\text{ mJ/cm}^2$ 高能量密度下的加工质量。Lopez 等^[12-13]指出当激光能量密度接近材料烧蚀阈值时能获得最优的加工表面质量。对于皮秒激光和飞秒激光,在同一位置进行多脉冲烧蚀会减小材料的烧蚀阈值^[9]。王文军等^[14]利用脉宽为 10 ps 的皮秒激光对 304 不锈钢进行单点多脉冲烧蚀,研究了 304 不锈钢烧蚀阈值与脉冲数的关系,发现单脉冲烧蚀率随着脉冲数的增加而减小。文献^[15]研究了超短脉冲激光在不同频率下烧蚀不锈钢时产生的热积累现象,指出了高频下的热量传播距离较短,更容易在局部区域造成较大的热积累效应;同时,利用高速扫描振镜对不锈钢进行烧蚀,在保证烧蚀率的同时获得了较优的表面质量。

本文采用 $0.4\sim 20\text{ MHz}$ 的高重复频率皮秒激光烧蚀 304 不锈钢,研究皮秒激光在高重复频率下的烧蚀质量与烧蚀率,为高重复频率皮秒激光在工业上的应用提供参考。

2 实验设备与方法

实验样品采用 304 不锈钢,样品厚度为 2 mm ,样品中 $\omega(\text{C})=0.045\%$, $\omega(\text{Cr})=18.2\%$, $\omega(\text{N})=8.16\%$,其中 $\omega(\cdot)$ 为质量分数。样品表面需要进行打磨清洁处理以去除覆盖在不锈钢表面富含 Cr 的氧化物。

激光加工系统中激光器采用德国 EDGEWAVE 公司 PX 系列,激光脉宽为 10 ps 、波长为 532 nm 、最大频率可达 20 MHz 、最大平均功率为 160 W ,功率连续可调。扫描振镜和运动平台采用美国 AEROTECH 控制系统,扫描振镜的最大扫描速度为 2.5 m/s 、场镜焦距为 100 mm 、激光聚焦后光斑直径为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 左右。皮秒激光加工装置如图 1 所示。

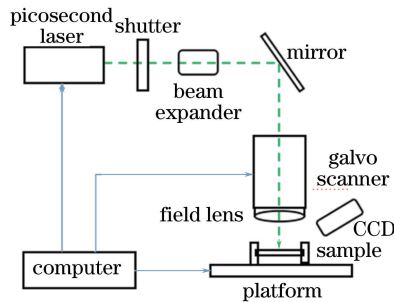


图 1 皮秒激光加工装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of picosecond laser processing device

实验采用线型扫描方式烧蚀,扫描路径如图 2(a) 所示,其中扫描间隔 d 设为 $5\text{ }\mu\text{m}$,扫描次数设为 20

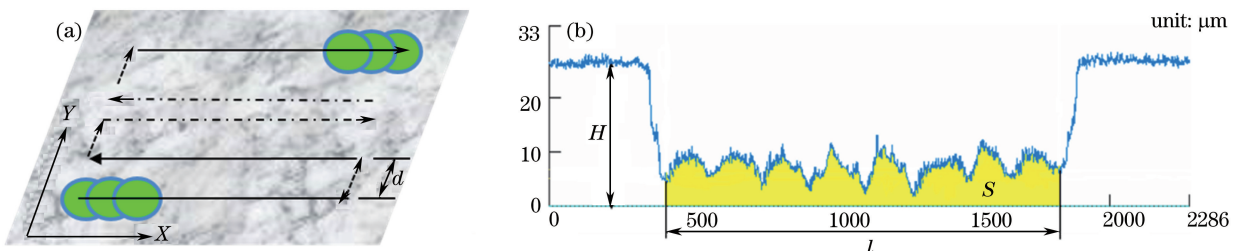


图 2 (a) 激光扫描路径示意图; (b) 材料去除后的截面轮廓图

Fig. 2 (a) Sketch of laser scanning path; (b) section profile after ablation

次。实验在常态环境下进行,无稀有气体保护。图 2(b)所示为实验中材料去除后的截面轮廓,进行快速扫描时扫描振镜在起点和终点位置存在加减速效应,无法达到预定的速度,因此,选取扫描段中间位置进行研究,在计算去除深度时,忽略扫描振镜加减速效应带来的影响。材料去除后的平均深度:

$$D = H - \frac{S}{l}, \quad (1)$$

式中 D 为平均深度, H 为未去除表面的高度, S 为轮廓与底面形成的面积, l 为底面长度。

材料去除率:

$$R_{\text{MMR}} = \frac{L_x \times L_y \times D}{\frac{L_x}{v} \times \frac{L_y}{d} \times n \times \frac{1}{60}} = \frac{60 \times v \times d \times D}{n}, \quad (2)$$

式中 R_{MMR} 为材料去除率, L_x 、 L_y 分别为材料去除部分的长与宽; v 为扫描振镜的扫描速度; n 为扫描次数, 实验中设定为 20; d 为扫描间隔, 实验中设定为 $5 \mu\text{m}$ 。单位功率烧蚀率:

$$R_{\text{MRP}} = \frac{R_{\text{MMR}}}{P}, \quad (3)$$

式中 R_{MRP} 为单位功率烧蚀率, P 为激光平均功率。

3 实验结果与讨论

3.1 不同频率下烧蚀效果分析

当平均功率为 10 W, 扫描速度为 1 m/s 时, 重复频率与单脉冲峰值能量密度及单位功率烧蚀率的关系如图 3 所示。单脉冲峰值能量密度(F_{pk})主要由平均功率及重复频率决定:

$$F_{\text{pk}} = \frac{8P}{\pi a^2 f_p}, \quad (4)$$

式中 P 为平均功率, a 为光斑聚焦后的直径, f_p 为重复频率。由(4)式可知当平均功率一定时, 单脉冲峰值能量密度与重复频率成反比。

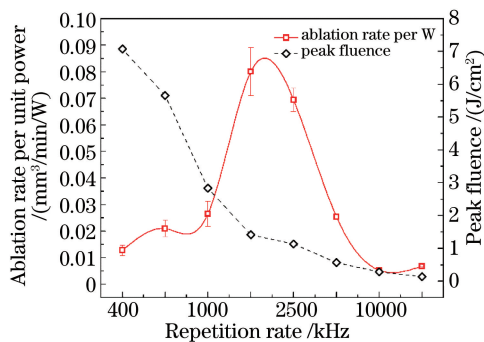


图 3 单脉冲峰值能量密度和单位功率烧蚀率随重复频率的变化

Fig. 3 Single pulse peak fluence and ablation rate per unit power as functions of repetition rate

由图 3 可知, 当重复频率为 2 MHz 左右时, 单位功率烧蚀率达到了最大值 $0.08 \text{ mm}^3/\text{min}/\text{W}$, 而此时的单脉冲峰值能量密度为 $1.42 \text{ J}/\text{cm}^2$, 远小于重复频率为 400 kHz 时 $7.08 \text{ J}/\text{cm}^2$ 的单脉冲峰值能量密度。当重复频率为 20 MHz 时单脉冲能量峰值密度为 $0.14 \text{ J}/\text{cm}^2$, 其单位功率烧蚀率与重复频率为 400 kHz 时的单位功率烧蚀率接近。由此可知, 单脉冲峰值能量密度是影响烧蚀率的重要因素, 但不是唯一因素。

激光作用于材料时, 有一大部分能量滞留在激光辐射区域, 然后以热的形式向周围传播。脉冲频率较高时, 相邻脉冲之间的时间间隔较短, 造成前一脉冲产生的热还没有传出辐射体, 下一个脉冲又作用在辐射区域。热量在辐射体内逐渐累积, 辐射部分温度逐渐升高。同时, 基体温度升高会使材料烧蚀阈值减小。根据累积模型^[14], 高频率下多脉冲烧蚀阈值 $F_{\text{th}}(N)$ 与单脉冲烧蚀阈值 $F_{\text{th}}(1)$ 的关系为

$$F_{\text{th}}(N) = F_{\text{th}}(1) N^{A-1}, \quad (5)$$

式中 N 为脉冲个数, A 为累积系数, 激光作用于金属材料产生烧蚀时, $A < 1$ 。根据(5)式, 当脉冲数增加时,

对应的烧蚀阈值减少。激光频率处于兆赫兹量级,扫描速度为 1 m/s 左右时,光斑重叠率接近 100%,此时单位时间内线性烧蚀可以近似为多脉冲单点烧蚀。实验中,扫描振镜的扫描速度相同,重复频率越大意味着单位时间里的脉冲数越多,故烧蚀阈值较小。同时脉冲烧蚀深度 L 与单脉冲能量密度 F_{pk} 及烧蚀阈值 F_{th} 的关系为

$$L = \delta \ln \left(\frac{F_{pk}}{F_{th}} \right), \quad (6)$$

式中 δ 为发生强烧蚀时的电子热传递深度或发生弱烧蚀时的光子穿透深度。

由(6)式可知,烧蚀的深度与单脉冲峰值能量密度和烧蚀阈值的比值相关,单脉冲峰值能量密度与重复频率比值决定着烧蚀率,单纯提高单脉冲峰值能量密度不一定能提高烧蚀率。图 3 所示的 2 MHz 对应的单脉冲峰值能量密度小于 400 kHz 对应的单脉冲峰值能量密度,但 2 MHz 对应的烧蚀阈值也较小,故产生了 2 MHz 时的烧蚀率大于 400 kHz 时的烧蚀率的现象。

图 4 所示为不同重复频率对应的烧蚀表面的 3D 形貌图和扫描电镜(SEM)图,其中色条颜色为对应表面轮廓的高度分布情况。可以看到,当重复频率为 400 kHz 时不锈钢发生了明显的强烧蚀效应,烧蚀表面出现了密集的凹坑和突起,有明显的重铸现象;2.5 MHz 频率下烧蚀表面仍有凹坑出现,但数量明显减少,凹坑周边没有出现明显突起,表面相对平滑;10 MHz 频率下获得了光滑的去除了表面,该频率下对应的峰值能量密度为 0.28 J/cm^2 ,弱烧蚀效应明显,表面平整光滑,没有明显的突起与凹坑。当激光发生弱烧蚀时,脉冲峰值能量密度较小,能获得比强烧蚀更优的表面质量,但烧蚀率较低。因此,在兆赫兹量级皮秒激光烧蚀时,高频低脉冲能量峰值密度更有利于提高表面质量。

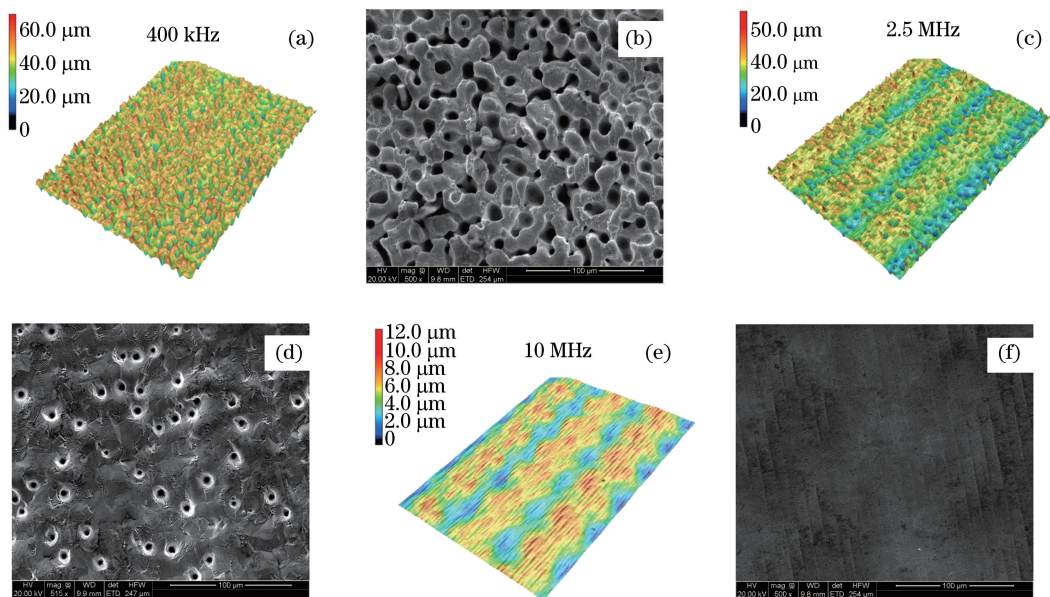


图 4 不同重复频率对应的烧蚀表面的 3D 形貌图及 SEM 图。(a) (b) 400 kHz; (c) (d) 2.5 MHz; (e) (f) 10 MHz

Fig. 4 3D and SEM micrographs of ablation surfaces under different repetition rate.

(a) (b) 400 kHz; (c) (d) 2.5 MHz; (e) (f) 10 MHz

3.2 不同扫描速度下烧蚀效果分析

当平均功率为 10 W,频率分别为 400 kHz、2.5 MHz 和 10 MHz 时,扫描速度与烧蚀深度的关系如图 5 所示。在三个固定频率下,去除深度随扫描速度的增加而减小。选定光斑半径作为单位距离 D' ,单位距离内的烧蚀可近似为单点烧蚀,扫描速度为 v ,重复频率为 f ,此时单位距离内的脉冲数

$$N = f \frac{D'}{v}. \quad (7)$$

根据(5)、(6)式,可得烧蚀深度

$$L = \delta(S - 1) \ln v + \delta \ln \left[\frac{F_{pk}}{F_{th}(1)} \right] - \delta(S - 1) \ln(fD'), \quad (8)$$

当激光频率 f 及 F_{pk} 一定时, δ 、 S 和 $F_{th}(1)$ 均为定值且 $S < 1$, 所以烧蚀深度 L 与扫描速度 v 的关系可以简化为

$$L \sim -\ln v. \quad (9)$$

图 5 所示的曲线趋势符合(9)式的对数函数变化规律。扫描速度增加时, 单位距离内的脉冲数减少, 对应的材料烧蚀阈值增加; 同时, 作用的脉冲越少意味着单位距离内辐射能量越少。因此材料烧蚀阈值增加和材料受到的辐照能量变少均会造成烧蚀深度变小。

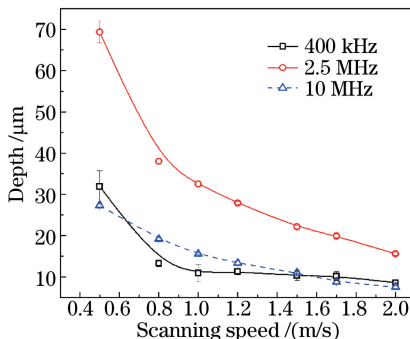


图 5 不同频率下扫描速度与烧蚀深度的关系

Fig. 5 Ablation depth as a function of scanning speed under different scanning frequency

图 6(a) 所示为烧蚀率与扫描速度的关系, 当扫描速度增大时, 烧蚀深度变小, 烧蚀所用时间变短, 出现烧蚀率波动的情况。图 6(b) 所示为不同频率下扫描速度与表面粗糙度的关系, 从图中可以看出随着扫描速度的增大, 不同频率下的粗糙度均有减小趋势。扫描速度增大, 单位距离内作用脉冲数减少, 峰值能量密度更接近烧蚀阈值, 表面粗糙度减小。在 2.5 MHz 和 10 MHz 两种重复频率下, 当扫描速度达到 1.2 m/s 后, 粗糙度的变化不大, 此时烧蚀表面质量相对稳定。

由图 6 可得出, 在 2.5 MHz 和 10 MHz 两种频率下, 速度在 1.0~1.7 m/s 区间内烧蚀率和烧蚀质量变化不大。随着扫描速度继续增大, 烧蚀表面质量无明显变化, 但烧蚀率有所降低, 故对于 2.5 MHz 和 10 MHz 两种频率, 1.0~1.7 m/s 为较优的速度选择区间。对于 400 kHz 频率, 在 1.0~2.0 m/s 速度区间内, 增大扫描速度, 去除效率和表面质量均得到提高。故对于 400 kHz 频率, 更大的扫描速度有助于提高烧蚀效果。

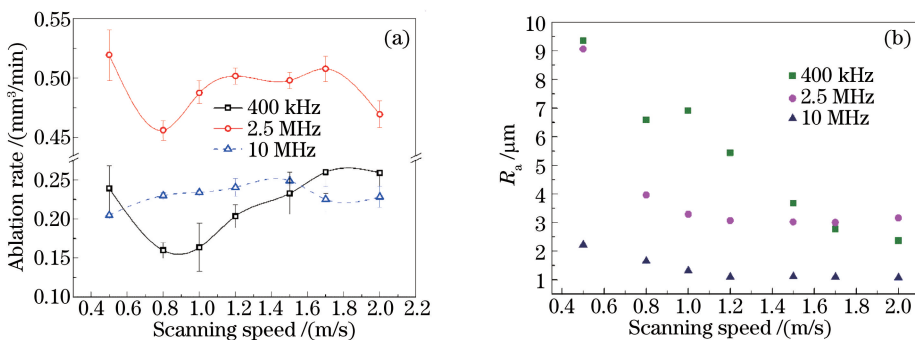


图 6 不同频率下扫描速度与(a) 烧蚀率的关系和(b) 表面粗糙度的关系

Fig. 6 (a) Ablation rate and (b) surface roughness as functions of scanning speed under different scanning frequency

3.3 烧蚀过程扫描路径对烧蚀表面质量的影响

采取图 7 所示的两种扫描路径, 扫描次数为 20 次, 重复频率设定为 10 MHz, 平均功率设定为 10 W, 扫描速度设定为 1 m/s, 得到的表面形貌图如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 采取“网”型扫描路径得到的烧蚀表面质量要优于采取“之”型扫描路径得到的表面质量。对比两者截面轮廓可以发现: “之”型路径下出现了类似于波纹度的明显波动, 而“网”型路径下烧蚀表面大体轮廓较为平稳。“之”型路径下出现较大范围轮廓波动的主要原因在于, 激光光束能量服从高斯分布, 越靠近中心位置能量越大, 烧蚀效果越明显, 多次扫描时烧蚀效果明显的区域不断叠加, 这造成了此区域相对

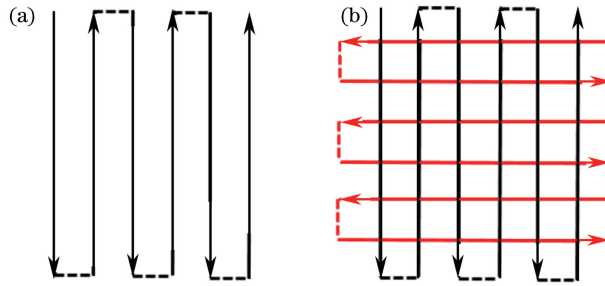


图7 激光烧蚀时采取的两种扫描途径。(a)“之”型路径；(b)“网”型路径

Fig. 7 Two scanning paths used in laser ablation process. (a) Reciprocating scanning path; (b) cross scanning path

于能量较弱的区域的深度更大。“网”型路径在相互垂直的两个方向进行扫描,避免了在同一位置仅出现能量较强或者较弱的现象,能量分布整体相对均匀,提高了整体表面质量。

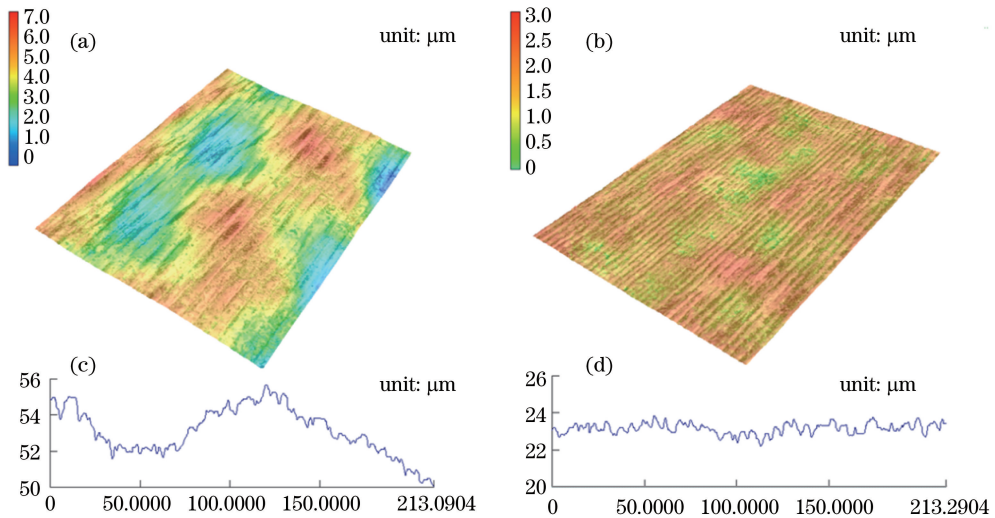


图8 不同路径下获得的表面及截面轮廓。(a) (c)“之”型路径；(b) (d)“网”型路径

Fig. 8 Surface and section profiles under different scanning paths. (a) (c) Reciprocating path; (b) (d) cross path

4 结 论

1) 高频率皮秒激光烧蚀不锈钢时,单脉冲峰值能量密度不是影响烧蚀率的唯一因素。兆赫兹量级皮秒激光作用于不锈钢时,频率越高,不锈钢的烧蚀阈值越低,而单脉冲峰值能量密度与烧蚀阈值的比值决定烧蚀率。相比于低频高能量密度,高频低能量密度激光在烧蚀时能获得更优的表面烧蚀质量;

2) 将热累积模型应用到以扫描形式进行的激光烧蚀中,得出皮秒激光烧蚀深度与扫描速度呈对数函数关系,推算的数学模型在实验中得到验证。随着扫描速度的增加,烧蚀深度逐渐减小。在不同速度下,烧蚀率呈波动趋势,但在1.0~1.7 m/s速度区间内,2.5 MHz和10 MHz对应的烧蚀率变化趋势不大。随着扫描速度的增大,烧蚀后表面粗糙度先减小,然后趋于稳定;

3) 烧蚀后表面粗糙度与扫描路径相关,采用较复杂的“网”状路径可以避免在同一位置重复扫描的情况,整个扫描过程中能量分布更为均匀,可获得更平整的表面,提高表面质量。

参 考 文 献

- 1 Sezer H K, Li L, Schmidt M, *et al.*. Effect of beam angle on HAZ, recast and oxide layer characteristics in laser drilling of TBC nickel superalloys[J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2006, 46(15): 1972-1982.
- 2 Leigh S, Sezer K, Li L, *et al.*. Recast and oxide formation in laser-drilled acute holes in CMSX-4 nickel single-crystal superalloy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2010,

- 224(B7): 1005-1016.
- 3 Yang Qing, Du Guangqing, Chen Feng, *et al.*. Ultrafast thermal relaxation characteristics in gold film excited by shaped femtosecond laser pulses[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502005.
杨青, 杜广庆, 陈烽, 等. 飞秒激光整形脉冲激发金膜的超快热弛豫特性[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502005.
 - 4 Xing Songling, Liu Lei, Zou Guisheng, *et al.*. Effects of femtosecond lasers parameters on hole drilling of silica glass[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403001.
刑松龄, 刘磊, 邹贵生, 等. 飞秒激光参数对石英玻璃微孔加工的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403001.
 - 5 Weck A, Crawford T H R, Wilkinson D S, *et al.*. Laser drilling of high aspect ratio holes in copper with femtosecond, picosecond and nanosecond pulses[J]. Applied Physics A, 2008, 90(3): 537-543.
 - 6 Liu Lu, Ruan Liang, Zhang Tianrun, *et al.*. Experimental study on stainless steel micro-hole drilling with picosecond laser[J]. Applied Laser, 2015, 35(4): 472-478.
刘路, 阮亮, 张天润, 等. 皮秒激光加工不锈钢微孔实验研究[J]. 应用激光, 2015, 35(4): 472-478.
 - 7 Lü Xiaozhan, Ji Lingfei, Wu Yan, *et al.*. Fabrication of high performance anti-reflection silicon surface by picosecond laser scanning irradiation with chemical corrosion[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403006.
吕晓占, 季凌飞, 吴燕, 等. 皮秒激光-化学复合法制备高效减反射晶硅表面微结构研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403006.
 - 8 Ji Lingfei, Ling Chen, Li Qiurui, *et al.*. Research process and development of industrial application of picosecond laser processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 115-126.
季凌飞, 凌晨, 李秋瑞, 等. 皮秒激光工程应用研究现状与发展分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 115-126.
 - 9 Di Niso F, Gaudiuso C, Sibillano T, *et al.*. Role of heat accumulation on the incubation effect in multi-shot laser ablation of stainless steel at high repetition rates[J]. Optics Express, 2014, 22(10): 12200-12210.
 - 10 Ancona A, Roser F, Rademaker K, *et al.*. High speed laser drilling of metals using a high repetition rate, high average power ultrafast fiber CPA system[J]. Optics Express, 2008, 16(12): 8958-8968.
 - 11 Chichkov B N, Momma C, Nolte S, *et al.*. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A, 1996, 63(2): 109-115.
 - 12 Lopez J, Torres R, Zaouter Y, *et al.*. Study on the influence of repetition rate and pulse duration on ablation efficiency using a new generation of high power Ytterbium doped fiber ultrafast laser[C]. SPIE, 2013(8611): 861118.
 - 13 Neuenschwander B, Jaeggi B, Schmid M. From ps to fs: Dependence of the material removal rate and the surface quality on the pulse duration for metals, semiconductors and oxides[C]. ICALEO, 2012: 959-968.
 - 14 Zhao W Q, Wang W J, Jiang G D, *et al.*. Ablation and morphological evolution of micro-holes in stainless steel with picosecond laser pulses[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9-12): 1713-1720.
 - 15 Schille J, Schneider L, Mueller M, *et al.*. Highspeed laser micro processing using ultrashort laser pulses[J]. Journal of Laser Micro Nanoengineering, 2014, 9(2): 161-168.