

## 碳钢 MOPA 光纤激光器雕刻工艺优化

张敦港<sup>1,2</sup>, 罗文殊<sup>1,2</sup>, 董静<sup>1,2</sup>, 王海林<sup>1,2\*</sup>, 朱晓<sup>1,2</sup>, 朱广志<sup>1,2</sup><sup>1</sup>激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074;<sup>2</sup>华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

**摘要** 高功率纳秒光纤激光器已经被广泛应用于激光雕刻中。以碳钢作为研究材料,使用主振荡功率放大(MOPA)光纤激光器系统研究了脉冲宽度、能量密度和脉冲重复频率(PRF)对激光雕刻结果的影响,且每组参数作用下的材料去除率(MRR)和平均表面粗糙度( $S_a$ )使用三维(3D)轮廓仪进行测量。研究发现:使用较长的脉冲宽度和较高的能量密度会得到较大的MRR和 $S_a$ ;使用较短的脉冲宽度和较高的能量密度也能得到较大的MRR和 $S_a$ ,这是较高的脉冲重叠率造成的;存在临界PRF,该值在使得MRR较大的同时,可使得 $S_a$ 较小。最后,使用优化的工艺参数得到了高质量、高MRR的雕刻效果。

**关键词** 激光器; 深度雕刻; MOPA 光纤激光器; 材料去除率; 平均表面粗糙度

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2014001

## Process Optimization for MOPA Fiber Laser Engraving of Carbon Steel

Zhang Dungan<sup>1,2</sup>, Luo Wenshu<sup>1,2</sup>, Dong Jing<sup>1,2</sup>, Wang Hailin<sup>1,2\*</sup>, Zhu Xiao<sup>1,2</sup>, Zhu Guangzhi<sup>1,2</sup><sup>1</sup>National Engineering Research Center for Laser Processing, Wuhan 430074, Hubei, China;<sup>2</sup>School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China

**Abstract** High-power nanosecond fiber lasers have been widely used in laser engraving. In this paper, the effects of pulse width, energy density, and pulse repetition frequency (PRF) on laser engraving results are studied by using a master oscillator power amplifier (MOPA) fiber laser system, with carbon steel as the research material. The material removal rate (MRR) and average surface roughness ( $S_a$ ) of each group of parameters are measured by a three-dimensional (3D) profilometer. It is found that longer pulse width and higher energy density can result in larger MRR and  $S_a$ . Larger MRR and  $S_a$  can also be obtained with short pulse width and high energy density, which is caused by a high pulse overlap rate. There is a critical PRF that can simultaneously make MRR large and  $S_a$  small. Finally, the optimized process parameters are used to achieve the engraving effects of high quality and high MRR.

**Key words** lasers; deep engraving; MOPA fiber laser; material removal rate; average surface roughness

## 1 引言

随着激光技术的不断发展,激光的应用领域在不断扩大,关于激光加工的研究也在逐渐增多<sup>[1-4]</sup>。就雕刻工艺而言,与传统的机械雕刻方法相比,激光雕刻具有灵活性高、操作简单、适应范围广、速度快、质量好和精度高等优点<sup>[5-6]</sup>。同时,超短脉冲(皮秒和飞秒)和短脉冲(纳秒和微秒)激光器都可用于材料雕刻,而纳秒激光器具有成本更低的优势,故其作为加工工具在工业中得到了广泛应用<sup>[7-8]</sup>。

激光雕刻的目的之一是通过去除材料在工件上面雕刻出具有一定深度、永久且唯一的标识,如二维码、标识号、文字和序列号等。当工件被应用于任何场景时,这些标识都要可读且不被更改<sup>[9-11]</sup>。激光微细加工提供了一种直接从计算机辅助设计(CAD)数据雕刻各种标识的新方法,该过程是一种烧蚀去除过程,主要原理是激光束和被加工工件之间的烧蚀作用,材料通过一层一层烧蚀机制熔化蒸发而被去除,最终得到相应的雕刻标识<sup>[12-13]</sup>。该加工方式可以雕刻出任意形状的标识,且雕刻精细,图形清晰<sup>[14-15]</sup>。高质量的雕刻

收稿日期: 2022-03-07; 修回日期: 2022-04-12; 录用日期: 2022-05-10

基金项目: 湖北省重点研发计划(2020BHB015)

通信作者: \*wanghl@hust.edu.cn

效果需要建立在合理的工艺参数选择上,然而目前关于高平均功率纳秒激光器对金属材料的雕刻质量和雕刻效果影响的研究还比较少。

基于提高材料雕刻质量和雕刻效率的目的,本文以碳钢作为研究对象,采用主振荡功率放大(MOPA)光纤激光器进行深度雕刻实验,系统研究了激光脉冲宽度、能量密度和脉冲重复频率(PRF)对雕刻结果的影响,并解释了实验现象产生的原理。此外,通过优化工艺参数的方式获得了高质量、高材料去除率(MRR)的雕刻效果。

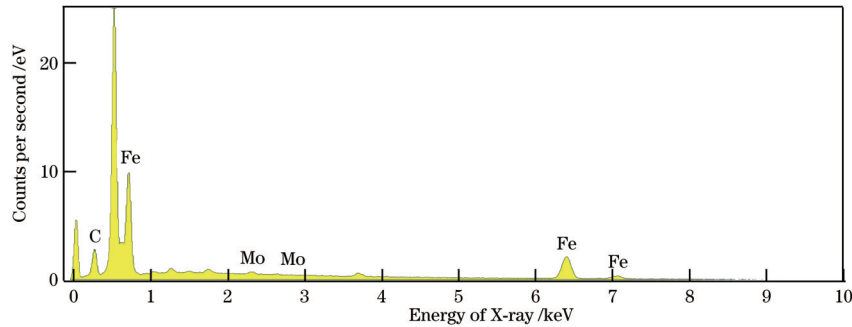


图1 碳钢表面能谱图

Fig. 1 Surface energy spectrum of carbon steel

表1 碳钢化学组成成分

Table 1 Chemical composition of carbon steel

| Chemical composition | C    | O     | Fe    | Mo   |
|----------------------|------|-------|-------|------|
| Ratio / %            | 6.57 | 27.88 | 64.20 | 1.35 |

## 2.2 实验设备

实验采用的激光器是MOPA光纤激光器(型号为YFPN-150/200-GM-LR05071A),波长为1060~1080 nm,最大单脉冲能量为1.5 mJ,脉冲重复频率高达3 MHz,光束质量为 $M^2 \leq 1.8$ ,脉冲宽度为10~500 ns。实验时使用的平均功率为100 W,激光波长为1062 nm。每个脉冲宽度下存在唯一的PRF(称为 $PRF_0, F_{PRF_0}$ ),在该重复频率下可获得最大的单脉冲能量和峰值功率。选择示波器实测脉冲宽度为20、48、105、170、220、270 ns的6组激光脉冲进行实验研究,其波形图如2所示。

对于激光加工装置,从激光器发射出的激光首先被准直镜准直,然后经过反射镜传输到扫描振镜中,最终被焦距为160 mm的聚焦透镜聚焦后照射到工件上。准直光束的光斑直径为8 mm,聚焦后在工件上的聚焦光斑直径为33  $\mu\text{m}$ 。扫描振镜和激光器由计算机软件进行控制,实验光路示意图如图3所示,其中HR为高反射镜。

## 2.3 实验方案

按照表2中列出的激光工艺参数,使用振镜在碳钢工件表面扫描加工5 mm×5 mm大小的矩形区域,其中 $P_0$ 为光斑搭接率, $\tau$ 为脉冲宽度。激光扫描遍数为10,扫描线间距为0.02 mm。面能量密度的计算公

## 2 实验材料和实验方案

### 2.1 实验材料

实验材料使用尺寸为48 mm×28 mm×10 mm的碳钢,主要由C、Fe、O等元素组成,具体组成成分和能谱图分别如表1和图1所示。雕刻图形为5 mm×5 mm大小的矩形。使用三维(3D)轮廓仪测量雕刻深度和平均表面粗糙度( $S_a$ )。在雕刻之前,使用丙酮清洗样品去除表面污染。

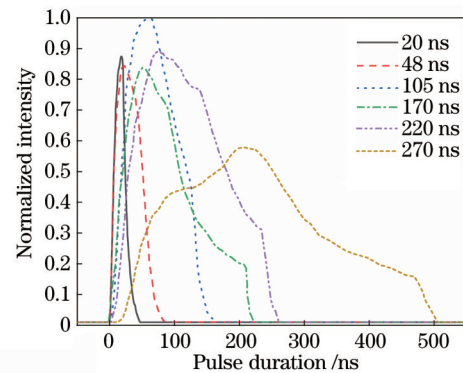


图2 实验选定的激光脉冲宽度波形图

Fig. 2 Waveform diagram of laser pulse width selected in experiment

式为

$$E_{DA} = (1/\Delta S)E_P(1/\Delta H), \quad (1)$$

式中: $E_P$ 为单脉冲能量; $\Delta S$ 为线扫描方向上一个脉冲与下一个脉冲之间的距离; $\Delta H$ 为扫描间距。激光扫描路线示意图如图4所示。

上述实验主要研究了面能量密度 $E_{DA}$ 和脉冲宽度对激光雕刻MRR和 $S_a$ 的影响。此外,选择脉冲宽度为170 ns,固定能量密度为3.5 J/mm<sup>2</sup>,设置激光扫描线间距为0.02 mm,遍数为20,改变PRF,研究在 $E_{DA}$ 恒定的情况下,PRF对雕刻效果的影响情况,如表3所示。

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 $E_{DA}$ 和 $\tau$ 对MRR和 $S_a$ 的影响

实验形貌图如图5所示,可以看出:当 $E_{DA}$ 过大

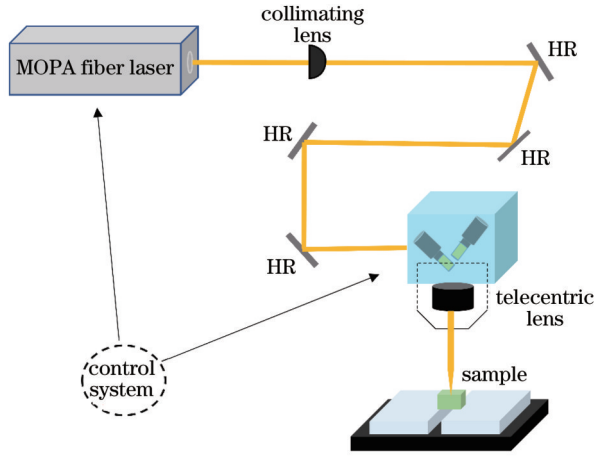


图 3 实验光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

(14.0 J/mm<sup>2</sup>)或者脉冲宽度为 20 ns 且脉冲重叠率过高时,雕刻过程中会熔化较多的材料,而这些熔化的材料不能得到有效去除,重新凝固后会产生较多的重铸层,导致材料 S<sub>a</sub>较大;当 E<sub>DA</sub><2.5 J/mm<sup>2</sup>时,MRR 较低,几乎没有雕刻深度。因此,将脉冲宽度为 20 ns 的实验参数、E<sub>DA</sub>为 14.0 J/mm<sup>2</sup>的实验参数和任何 E<sub>DA</sub>低于 2.5 J/mm<sup>2</sup>的实验参数进行排除,选择出合适的参数进行分析,最终得到的实验结果如图 6 所示。图 6 (a)为不同脉冲宽度下,MRR 随 E<sub>DA</sub>的变化散点图。可以看出,随着 E<sub>DA</sub>的增加或者脉冲宽度 τ 的增加,MRR 都在增加。图 6(b)为不同脉冲宽度下,S<sub>a</sub>随能量密度 E<sub>DA</sub>的变化散点图。可以看到,随着 E<sub>DA</sub>的增加

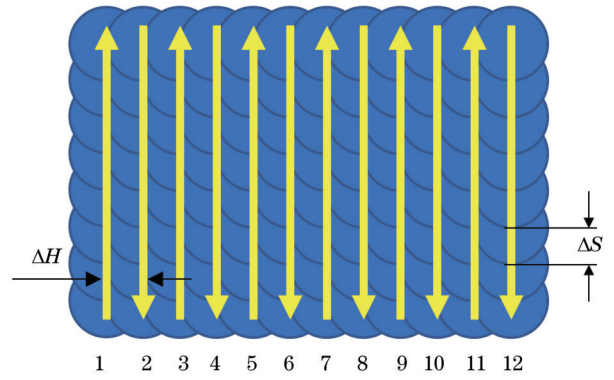


图 4 激光扫描路线示意图

Fig. 4 Schematic diagram of laser scanning route

或者脉冲宽度 τ 的增加,S<sub>a</sub>都在增加,这是在高能量密度雕刻一定深度后,后续材料得不到有效的溅射而在加工区域中重新凝固,使得表面毛刺增多导致的。一个特殊的情况是,当 E<sub>DA</sub>=4.5 J/mm<sup>2</sup>时,对于 48 ns 和 220 ns 脉冲宽度,随着 E<sub>DA</sub>的增加,MRR 在增加且伴随着 S<sub>a</sub>的减小。在脉冲宽度较小的情况下,虽然 MRR 较低,但是 S<sub>a</sub>较大,这是因为当脉冲宽度较小时,较高的重复频率会导致较高的脉冲重叠率,使得雕刻的表面熔化较多,引起重铸层较厚。提高扫描速度可以缓解脉冲重叠率高的问题,但这样会降低 MRR,进而导致不符合高 MRR 雕刻的要求。为得到高 MRR 和高质量的雕刻效果,需要保持一种平衡。效果较佳的情况为:当脉冲宽度为 270 ns、E<sub>DA</sub>=4.5 J/mm<sup>2</sup>时,MRR 较高为 22.08 mm<sup>3</sup>/min,S<sub>a</sub>较小为 44.631 μm。

表 2 区域深度雕刻参数表

Table 2 Parameter table of regional depth engraving

| Scanning speed / (mm·s <sup>-1</sup> ) | E <sub>DA</sub> / (J·mm <sup>-2</sup> ) | τ=20 ns, F <sub>PRF<sub>0</sub></sub> =900 kHz, E <sub>p</sub> =0.11 mJ | τ=48 ns, F <sub>PRF<sub>0</sub></sub> =400 kHz, E <sub>p</sub> =0.25 mJ | τ=105 ns, F <sub>PRF<sub>0</sub></sub> =140 kHz, E <sub>p</sub> =0.71 mJ | τ=170 ns, F <sub>PRF<sub>0</sub></sub> =90 kHz, E <sub>p</sub> =1.11 mJ | τ=220 ns, F <sub>PRF<sub>0</sub></sub> =90 kHz, E <sub>p</sub> =1.11 mJ | τ=270 ns, F <sub>PRF<sub>0</sub></sub> =90 kHz, E <sub>p</sub> =1.11 mJ |
|--|---|---|---|--|---|---|---|
| 357                                    | 14.0                                    | ΔS=0.4 μm, P <sub>0</sub> =99%  | ΔS=0.9 μm, P <sub>0</sub> =98%  | ΔS=2.6 μm, P <sub>0</sub> =92%   | ΔS=3.9 μm, P <sub>0</sub> =88%  | ΔS=3.9 μm, P <sub>0</sub> =88%  | ΔS=3.9 μm, P <sub>0</sub> =88%  |
| 714                                    | 7.0                                     | ΔS=0.8 μm, P <sub>0</sub> =98%  | ΔS=1.8 μm, P <sub>0</sub> =95%  | ΔS=5.1 μm, P <sub>0</sub> =85  | ΔS=7.9 μm, P <sub>0</sub> =76%  | ΔS=7.9 μm, P <sub>0</sub> =76%  | ΔS=7.9 μm, P <sub>0</sub> =76%  |
| 1111                                   | 4.5                                     | ΔS=1.2 μm, P <sub>0</sub> =96%  | ΔS=2.8 μm, P <sub>0</sub> =92%  | ΔS=7.9 μm, P <sub>0</sub> =76%   | ΔS=12.3 μm, P <sub>0</sub> =63%   | ΔS=12.3 μm, P <sub>0</sub> =63%   | ΔS=12.3 μm, P <sub>0</sub> =63%   |
| 1429                                   | 3.5                                     | ΔS=1.6 μm, P <sub>0</sub> =95%  | ΔS=3.6 μm, P <sub>0</sub> =90%  | ΔS=10.2 μm, P <sub>0</sub> =69%  | ΔS=15.9 μm, P <sub>0</sub> =52%   | ΔS=15.9 μm, P <sub>0</sub> =52%   | ΔS=15.9 μm, P <sub>0</sub> =52%   |
| 1667                                   | 3.0                                     | ΔS=1.9 μm, P <sub>0</sub> =94%  | ΔS=4.2 μm, P <sub>0</sub> =87%  | ΔS=11.9 μm, P <sub>0</sub> =64%  | ΔS=18.5 μm, P <sub>0</sub> =44%   | ΔS=18.5 μm, P <sub>0</sub> =44%   | ΔS=18.5 μm, P <sub>0</sub> =44%   |
| 2000                                   | 2.5                                     | ΔS=2.2 μm, P <sub>0</sub> =93%  | ΔS=5.0 μm, P <sub>0</sub> =85%  | ΔS=14.3 μm, P <sub>0</sub> =57%  | ΔS=22.2 μm, P <sub>0</sub> =33%   | ΔS=22.2 μm, P <sub>0</sub> =33%   | ΔS=22.2 μm, P <sub>0</sub> =33%   |
| 2500                                   | 2.0                                     | ΔS=2.8 μm, P <sub>0</sub> =91%  | ΔS=6.3 μm, P <sub>0</sub> =81%  | ΔS=17.9 μm, P <sub>0</sub> =46%  | ΔS=27.8 μm, P <sub>0</sub> =16%   | ΔS=27.8 μm, P <sub>0</sub> =16%   | ΔS=27.8 μm, P <sub>0</sub> =16%   |
| 3333                                   | 1.5                                     | ΔS=3.7 μm, P <sub>0</sub> =88%  | ΔS=8.3 μm, P <sub>0</sub> =74%  | ΔS=23.8 μm, P <sub>0</sub> =28%  | ΔS=37.0 μm, P <sub>0</sub> =8%  | ΔS=37.0 μm, P <sub>0</sub> =8%  | ΔS=37.0 μm, P <sub>0</sub> =8%  |

表 3 PRF 对雕刻效果的影响情况

Table 3 Effect of PRF on engraving effect

| RPF /kHz | $E_p$ /mJ | $P_0$ /% |
|----------|-----------|----------|
| 150      | 0.95      | 71       |
| 200      | 0.72      | 78       |
| 250      | 0.57      | 82       |
| 300      | 0.47      | 85       |
| 350      | 0.41      | 87       |
| 400      | 0.36      | 89       |

使用 3D 轮廓仪测量 270 ns 脉冲宽度、4.5 J/mm<sup>2</sup>  $E_{DA}$  下深度雕刻的 3D 轮廓图和  $S_a$ , 结果分别如图 7 和

图 8 所示。在图 7 中,  $\Delta L$  为测量区域 1 (雕刻后凹陷的表面) 中心位置到测量区域 2 (样品原始表面) 中心位置的横向距离,  $\Delta Z$  为测量区域 1 和测量区域 2 的高度差,  $\theta$  为倾斜角。在图 8 中,  $S_q$  为均方根高度, 表示定义区域各点高度的均方根, 相当于高度的标准偏差,  $S_{mean}$  为算术平均高度, 表示相对于表面的平均面, 各点高度差绝对值的平均值。可以看出, 该参数下雕刻 10 遍后加工区域深度为 113.33  $\mu\text{m}$ ,  $S_a$  为 46.631  $\mu\text{m}$ , 去除的材料体积为 2.83  $\text{mm}^3$ , 记录的加工时间为 7.7 s, 从而计算得到最终的 MRR 为 22.08  $\text{mm}^3/\text{min}$ 。在此参数下, MRR 较高且  $S_a$  较小, 表明此参数是一组较佳的深度雕刻加工参数。

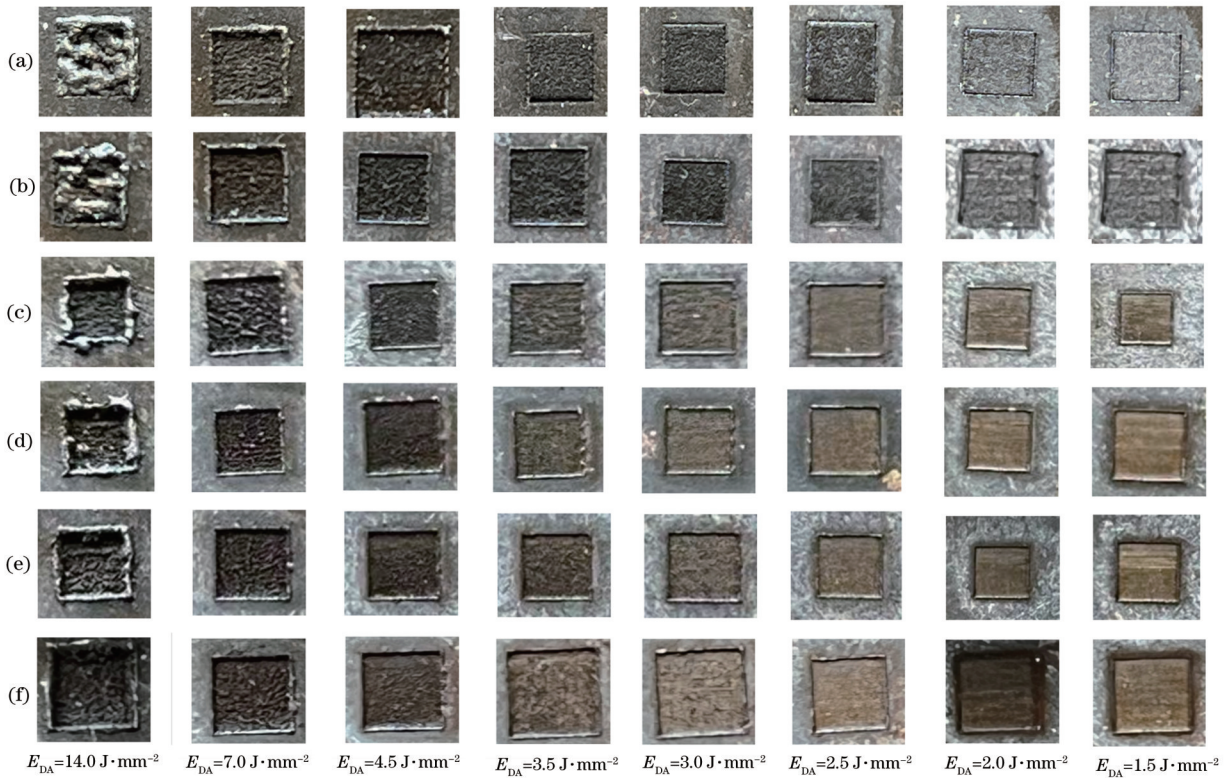


图 5 不同脉冲宽度下的表面形貌图。(a) 20 ns; (b) 48 ns; (c) 105 ns; (d) 170 ns; (e) 220 ns; (f) 270 ns  
Fig. 5 Surface topography under different pulse width. (a) 20 ns; (b) 48 ns; (c) 105 ns; (d) 170 ns; (e) 220 ns; (f) 270 ns

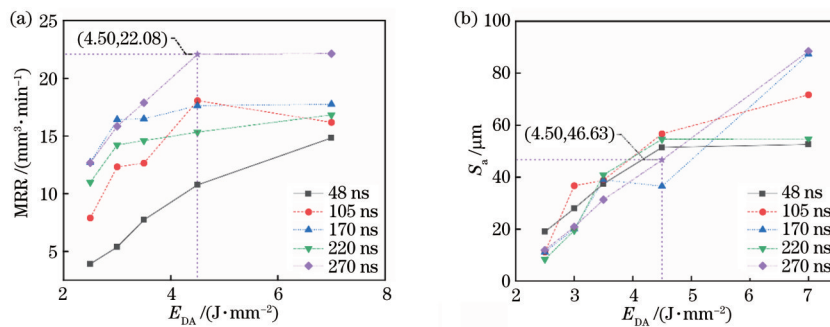


图 6 不同脉冲宽度下的雕刻结果。(a) MRR 随  $E_{DA}$  的变化散点图; (b)  $S_a$  随  $E_{DA}$  的变化散点图  
Fig. 6 Engraving results under different pulse widths. (a) Scatter diagram of MRR varying with  $E_{DA}$ ; (b) scatter diagram of  $S_a$  varying with  $E_{DA}$

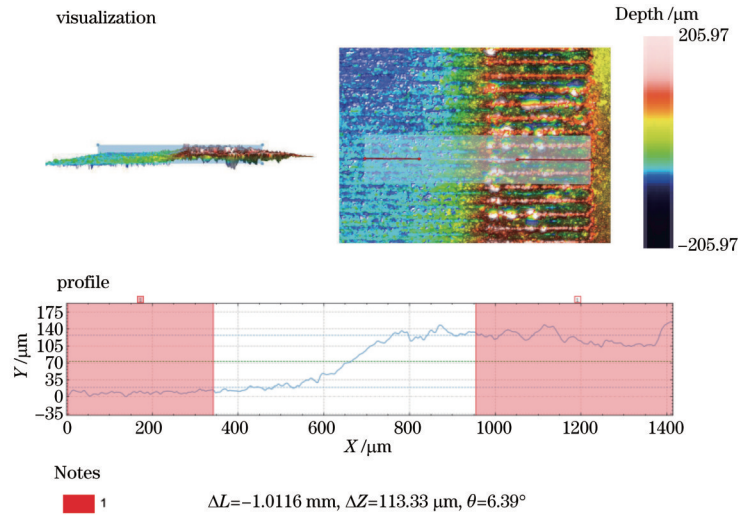


图 7 当脉冲宽度为 270 ns,  $E_{DA}$  为 4.5 J/mm<sup>2</sup> 时, 深度雕刻的 3D 轮廓图  
Fig. 7 3D contour of depth engraving when pulse width is 270 ns and  $E_{DA}$  is 4.5 J/mm<sup>2</sup>

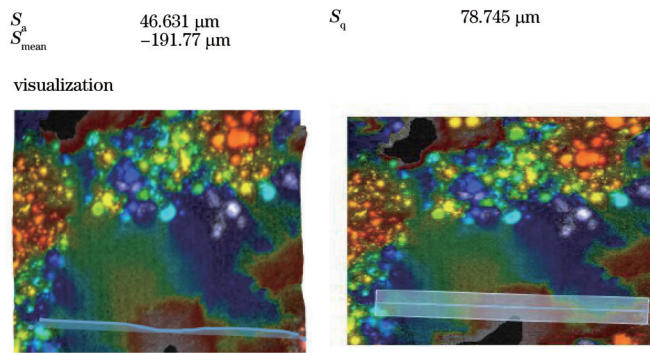


图 8 当脉冲宽度为 270 ns,  $E_{DA}$  为 4.5 J/mm<sup>2</sup> 时, 深度雕刻的  $S_a$  测量图  
Fig. 8  $S_a$  measurement diagram of depth engraving when pulse width is 270 ns and  $E_{DA}$  is 4.5 J/mm<sup>2</sup>

### 3.2 PRF 对 MRR 和 $S_a$ 的影响

为了研究 PRF 对雕刻结果的影响, 设置  $E_{DA}$  = 3.5 J/mm<sup>2</sup>, 脉冲宽度固定为 170 ns, 功率为 100 W, 扫描

5 mm×5 mm 大小的矩形区域, 扫描遍数为 20, 测量不同重复频率 (150~400 kHz) 雕刻下的 MRR 和  $S_a$ , 结果如图 9 所示。雕刻实验样品表面形貌图如图 10 所示。

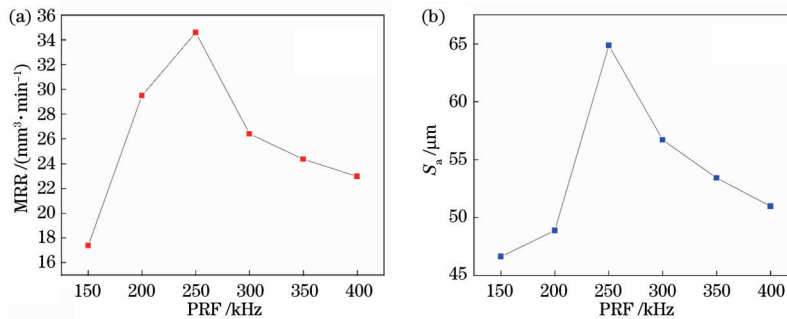


图 9 不同重复频率下的雕刻结果; (a) MRR 随 PRF 的变化散点图; (b)  $S_a$  随 PRF 的变化散点图  
Fig. 9 Engraving results under different repetition frequencies. (a) Scatter diagram of MRR varying with PRF; (b) scatter diagram of  $S_a$  varying with PRF

从图 9 中可以发现如下结论。当重复频率低于 250 kHz 时, 随着重复频率的增加, MRR 和  $S_a$  在增加。此时, 低 PRF (100 kHz) 会对熔融材料进行高效溅射, 进而可以得到良好的表面质量, 而更高的 PRF 会带来

更大的熔化区, 使得  $S_a$  增加。当重复频率高于 250 kHz 时, 随着重复频率的增加, MRR 和  $S_a$  在减小。过高的重复频率会导致脉冲重叠率过高, 产生闭孔堵塞效应, 即熔化的材料不能有效去除, 此时 MRR 降

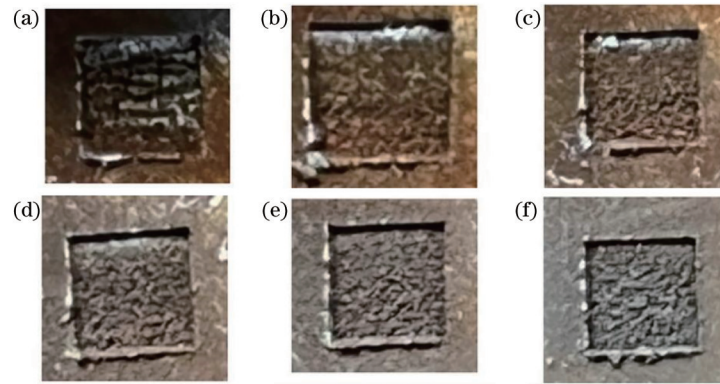


图 10 不同重复频率下雕刻的表面形貌图。(a) 150 kHz; (b) 200 kHz; (c) 250 kHz; (d) 300 kHz; (e) 350 kHz; (f) 400 kHz  
Fig. 10 Surface topography of depth engraving under different repetition frequencies. (a) 150 kHz; (b) 200 kHz; (c) 250 kHz; (d) 300 kHz; (e) 350 kHz; (f) 400 kHz

低。另外,过高的重复频率会使单脉冲能量下降,此时  $S_a$  得到了改善。一般可以认为更高的 PRF 和更大的  $E_{DA}$  会带来更大的 MRR,但伴随着表面毛刺的增加,这意味着在区域雕刻时会带来更大的  $S_a$ 。

## 4 结 论

使用 MOPA 脉冲光纤激光器对碳钢进行雕刻,旨在探究 PRF、脉冲宽度和  $E_{DA}$  对激光雕刻 MRR 和  $S_a$  的影响,从而优化工艺参数,得到适合雕刻碳钢的参数。通过实验,得到以下结论。

1) 脉冲宽度越长且  $E_{DA}$  越大,会导致最终雕刻的 MRR 越高,同时伴随着更大的  $S_a$ 。这是因为高的能量密度或者较长的激光与材料相互作用时间会熔化去除更多的材料,而雕刻一定深度后,后续材料得不到有效的溅射,在加工区域中会重新凝固,进而使得表面毛刺增多。当只需要考虑材料表面的加工质量时,可以使用短脉冲宽度、低能量密度的激光参数进行加工,使得材料表面相对光滑。

2) 脉冲宽度较小的情况下产生低的 MRR 也会伴随着高的  $S_a$ ,这是因为当脉冲宽度较小时,较高的重复频率会导致较高的脉冲重叠率,进而使得雕刻的表面熔化较多,引起重铸层较厚。

3) 一般可以认为更高的 PRF 和更大的  $E_{DA}$  会带来更大的 MRR,但会伴随着毛刺量的增加,这意味着在区域雕刻时会带来更大的  $S_a$ 。

4) 高 MRR 高质量的雕刻效果为:当脉冲宽度为 270 ns、 $E_{DA}=4.5 \text{ J/mm}^2$  时, MRR 较高为  $22.08 \text{ mm}^3/\text{min}$ ,  $S_a$  较小为  $44.631 \mu\text{m}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] 陈登,张庆茂,郭亮,等.激光 3D 打标机加工浮雕工艺技术的研究[J].应用激光,2017,37(4):598-603.  
Chen D, Zhang Q M, Guo L, et al. Research on processing relief technology of laser 3D marking machine [J]. Applied Laser, 2017, 37(4): 598-603.
- [2] 赵江涛,吴志超,霍肖.光纤激光深度雕刻铝合金实验研究[J].模具制造,2020,20(9):57-60.

- Zhao J T, Wu Z C, Huo X. Experimental study on deep carving of aluminum alloy by fiber laser[J]. Die & Mould Manufacture, 2020, 20(9): 57-60.
- [3] 王宏杰,郭文刚,董兆辉,等.激光刻蚀技术的应用[J].红外与激光工程,2004,33(5):469-472.  
Wang H J, Guo W G, Dong Z H, et al. Application of laser etching technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(5): 469-472.
- [4] Lu J Z, Luo K Y, Zhang Y K, et al. Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel[J]. Acta Materialia, 2010, 58(16): 5354-5362.
- [5] Genna S, Leone C, Lopresto V, et al. Study of fibre laser machining of C45 steel: influence of process parameters on material removal rate and roughness[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(1): 1115-1118.
- [6] Wu B Y, Deng L M, Liu P, et al. Effects of picosecond laser repetition rate on ablation of  $\text{Cr}_{12}\text{MoV}$  cold work mold steel[J]. Applied Surface Science, 2017, 409: 403-412.
- [7] Petkov P V, Dimov S S, Minev R M, et al. Laser milling: pulse duration effects on surface integrity[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2008, 222(1): 35-45.
- [8] Anisimov S I, Luk'yanchuk B S. Selected problems of laser ablation theory[J]. Physics-Uspekhi, 2002, 45(3): 293-324.
- [9] 洪慎章.实用注塑模具结构图集[M].北京:化学工业出版社,2009.  
Hong S Z. Practical injection plastics mold structure atlas [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [10] 洪慎章.实用注塑成型及模具设计[M].2版.北京:机械工业出版社,2014.  
Hong S Z. Practical injection molding and mold design [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [11] 洪慎章.实用注塑模设计与制造[M].2版.北京:机械工业出版社,2016.  
Hong S Z. Design and manufacture of practical injection

- plastics die[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [12] 袁根福, 曾晓雁. 大理石的激光铣削加工试验研究[J]. 中国激光, 2003, 30(3): 275-278.  
Yuan G F, Zeng X Y. Experimental study of laser milling on marble[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(3): 275-278.
- [13] 袁根福, 曾晓雁. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷激光铣削试验研究[J]. 中国激光, 2003, 30(5): 467-470.  
Yuan G F, Zeng X Y. Experimental study of laser milling on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(5): 467-470.
- [14] 余震, 缪宪文, 文艺, 等. 采用 CO<sub>2</sub>激光器进行激光雕刻工艺研究[J]. 机械工程师, 2006(6): 41-43.  
Yu Z, Miao X W, Wen Y, et al. Technology research on CO<sub>2</sub> laser carving[J]. Mechanical Engineer, 2006(6): 41-43.
- [15] 赵静. 木质材料激光雕刻加工技术的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.  
Zhao J. The technological investigation of laser engraving wood[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.