

# 同点间隔多次激光微织构工艺研究

符永宏 刘强宪\* 叶云霞 华希俊 康正阳 符昊

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 探讨了单脉冲同点间隔多次(SPI)工艺对激光微织构加工效果的影响。采用纳秒倍频Nd<sup>3+</sup>:YAG激光器在45钢表面进行激光微织构实验,研究激光能量密度、脉冲个数对微凹腔几何形貌参数的影响规律;分析烧蚀所致表面等离子体对激光吸收率的影响;并从实验和温度场模拟角度,对比分析了SPI工艺相比同点连续多次工艺的特点及技术优势。结果表明:随激光能量密度增加,微凹腔直径呈对数函数关系增加,而凹腔深度则随之先增大后趋于平稳,最后略微下降。作用脉冲个数对凹腔直径影响不明显,但凹腔深度随之呈线性增加。较之同点连续多次工艺,SPI工艺能最大限度降低激光加工产生的负面热效应,且多脉冲作用对微织构内部形貌具有“平滑”作用;同时,在保证单个脉冲材料去除率的条件下,提高了激光加工高质量微织构的总效率。

**关键词** 激光光学;激光微织构;激光烧蚀;单脉冲同点间隔多次工艺;等离子体吸收

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.1203005

## Research on Laser Surface Micro Texturing Processing of Single Pulse Intervals

Fu Yonghong Liu Qiangxian Ye Yunxia Hua Xijun Kang Zhengyang Fu Hao

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

**Abstract** Effect of single pulse intervals (SPI) processing on the laser micro texture is discussed. An investigation on the 45 steel samples is performed by using a nanosecond frequency doubling Nd<sup>3+</sup>:YAG laser. The influencing laws of laser parameters (the laser fluence, number of pulses) and the geometrical parameters of micro-crater as well as surface plasma absorption rate of laser are investigated. Compared with continuous pulses processing, the advantage of SPI are analyzed from experiment and temperature field simulation. The results show that with the increase of the laser fluence, the micro-crater diameter increase with a logarithmic function, while the micro-crater depth increases, then level off, finally fall slightly down. Effect of pulse number on micro-crater diameter is not significant, but the micro-crater depth increases linearly. Compared with continuous pulses processing, SPI minimizes the heat effect which is negative, and the effect of multiple pulse on micro texture internal morphology has a "smooth" role; when ensuring the material removal rate of a single pulse, the efficiency of the laser processing high quality micro texture is improved.

**Key words** laser optics; laser micro texture; laser ablation; single pulse intervals processing; plasma absorption

**OCIS codes** 140.3390; 140.3515; 140.3530; 140.3540; 350.3390

## 1 引言

理论研究和实验研究均表明,摩擦副表面微织构可用于存储润滑油、收集磨损颗粒,有利于形成微流体动压润滑,进而改善润滑效果、降低磨损,延长摩擦副零件使用寿命<sup>[1-2]</sup>。自20世纪末,对表面织构技术的研

收稿日期:2015-08-03;收到修改稿日期:2015-08-30

基金项目:国家自然科学基金(51175233,51375211,51305168)、2012年国家重大科技成果转化项目(2060403)、江苏省工业支撑项目(BE2014115)、高等学校博士学科点专项科研基金(20113227110016)、江苏省青年科学基金项目(BK20130524)

作者简介:符永宏(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事摩擦润滑理论及激光应用技术等方面的研究。

E-mail: fyh@ujs.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: lqx406@163.com

究得到越来越多的重视。现有的表面织构方法主要有:反应离子刻蚀<sup>[3]</sup>、表面喷丸处理、电子束刻蚀、机械微刻及激光表面微织构<sup>[4]</sup>等,其中,激光表面微织构以其高灵活性、高效率、低成本、无接触加工及运用材料范围广等优异特性而得到高度关注<sup>[5-6]</sup>。

激光表面微织构,其基本原理为:采用短脉冲激光照射金属材料表面,气化烧蚀去除材料,制造出微米级的各种工件表面结构形貌。这种方法主要被用于以“减摩”为目的的摩擦副表面加工,减少零件表面的摩擦磨损,提高零件寿命,降低机械系统运行能耗。迄今,研究人员围绕激光表面微织构机理、工艺、设备及工程应用等方面进行了广泛研究。张朋波等<sup>[7-8]</sup>以温度场理论为基础,建立了激光烧蚀理论模型,研究了激光参数对烧蚀形貌形状和深度的影响。在此基础上,诺丁汉大学的 Gilbert 等<sup>[9-10]</sup>进一步简化模型,实现了材料表面微织构尺寸的快速预测。彭国良等<sup>[11]</sup>通过数值模拟计算了激光烧蚀复合材料过程中的激光透射率及表面温度。在工艺方面, Vilhena 等<sup>[12]</sup>过研究激光能量、模式等对表面微织构的影响,优化了激光微织构工艺参数。苏永生等<sup>[13-14]</sup>研究了脉冲频率、输出功率、扫描速度和离焦量对刀具表面微织构形貌和质量的影响。本课题组自 20 世纪 90 年代开始,围绕激光表面微织构设计、工艺以及设备等进行了理论和实验研究,取得了一系列成果<sup>[15-17]</sup>。为了实现激光微织构高效、精确、可控的产业化加工,课题组提出单脉冲同点间隔多次(SPI)工艺,并研发了与该工艺配套的机械和控制系统,其工作原理如图 1 所示<sup>[18]</sup>。图 1 是重复次数为 3 的微凹腔加工策略。激光脉冲与机械运动相匹配,靶材吸收 A1 脉冲后,当光束再次扫略过该位置时吸收 A2 脉冲, A3 脉冲同理。SPI 工艺的核心思想是:激光间隔多次作用于同一位置,减少热积累效应,提高微织构加工质量;同时,激光器连续高重复频率运转,不降低加工效率。该工艺于 2006 年提出,但是迄今有关该工艺方法的参数规律、温度积累特征等尚未进行细致研究和评价。

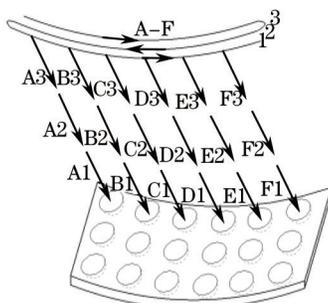


图 1 SPI 工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of SPI process

本文围绕 SPI 方法,较系统研究了采用 SPI 方法的激光加工工艺规律、温度场分布特征,比较 SPI 方法与传统的同点连续加工方法的加工效果,研究和评价了 SPI 方法的技术特点和优势。

## 2 实 验

### 2.1 实验装置及方案

实验采用自主研发声光调 Q 脉冲 KTP 倍频 Nd<sup>3+</sup>:YAG 激光微加工系统,该系统能在环面、锥面和平面上加工各种激光微织构,如微凹腔、各种微凹槽以及网纹等。激光器输出高斯光束,为了压缩发散角获得更小的聚焦光斑,在外光路中加装扩束镜,扩束后的激光束由透镜聚焦到工件表面。该激光系统参数如表 1 所示,激光器输出脉冲波形及光斑能量分布如图 2 所示。实验试样材料为 45 钢,其尺寸为 30 mm×30 mm×10 mm。将试样装夹在工作台上,并调整激光头与试样待加工表面之间的距离,确保待加工试样表面处在激光的焦点位置处。单脉冲能量 E 分别取 0.2、0.4、0.7、1.1、1.6、2.2、2.9、3.7 和 4.6 mJ。根据下述公式估算能量密度 F,

$$F = \frac{2E}{\pi\omega_0^2}, \quad (1)$$

式中  $\omega_0$  为光斑半径。因此,实验中采用的能量密度 F 分别为 14.15、28.31、49.54、77.85、113.23、155.70、205.24、261.85 以及 325.55 J/cm<sup>2</sup>。

表 1 激光系统参数

Table 1 Parameters of the laser system

Laser parameters	Value
Wavelength / nm	532
Pulse duration / ns	200
Pulse repetition rate /kHz	0.1~20
Maximum average power /W	20
Beam quality factor	$M^2 \leq 2$
Output beam diameter /mm	3
Beam expansion	$\times 3$
Focal lens /mm	60
Beam radius at focal plane / $\mu\text{m}$	30

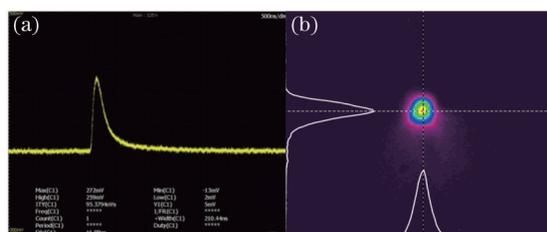


图 2 (a)脉冲波形图和(b)光斑能量分布图

Fig.2 (a) Shape of the laser pulse and (b) distribution of the beam cross section

## 2.2 形貌表征与检测

脉冲激光作用于金属材料表面时,会有明显的喷溅现象,在微凹腔周围形成熔渣,飞溅出来的残渣回落材料表面形成浮渣,影响对形貌的观察与检测。因此,需要将加工好的试样块放入超声波清洗机内清洗 10 min,去除凹腔周围及内部浮渣。采用 WYKO-NT1100 型表面三维形貌分析仪和 JSM-7001F 型场发射扫描电子显微镜(SEM)对激光微凹腔结构进行测量和观察。

## 3 结果与讨论

### 3.1 能量密度对凹腔直径的影响规律

图 3 中离散点为实验所得凹腔直径随激光能量密度和作用脉冲个数的变化规律,实线为根据点拟合所得曲线。由图 3 可见,凹坑直径随着能量密度  $F$  增加而逐渐变大。作用脉冲个数对凹坑直径的影响不大。

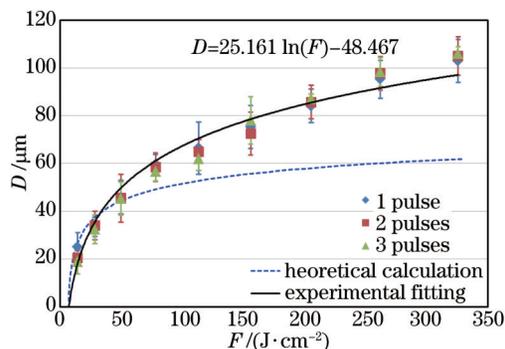


图 3 微凹腔直径随激光能量密度的变化曲线

Fig.3 Micro-crater diameters as functions of the laser fluence

烧蚀理论认为,当激光能量密度超过烧蚀阈值  $F_{th}$ ,则材料会被气化去除,形成凹腔。理论凹腔直径  $D_0$  的示意图如图 4 所示。 $D_0$ 和能量密度  $F$ 关系如下<sup>[19]</sup>:

$$D_0^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{F}{F_{th}}\right), \quad (2)$$

式中  $D_0$  为该模型下计算的凹腔直径,  $F$  为能量密度,  $F_{th}$  为阈值能量密度。

根据实验结果,用对数关系拟合了图3中凹腔直径  $D$  随能量密度  $F$  的变化关系曲线,如图中实线所示,所得方程为

$$D = 25.161 \ln(F) - 48.467, \quad (3)$$

该曲线的拟合优度  $R^2$  为 0.976。  $R^2$  大小可以反映趋势线的估计值与对应的实际数据之间的吻合度,其值介于 0~1,  $R^2$  愈接近 1,说明曲线与实测值之间的吻合度愈高。因此,(3)式能够反映凹腔直径随能量密度的实际变化规律。

此外,图3中实线曲线与横轴的交点所对应的能量密度,为45钢的激光烧蚀阈值  $F_{th}=6.86 \text{ J/cm}^2 (D_{th}=0)$ 。再将  $F_{th}$  值代入(2)式,可以得出理想条件下,凹腔直径  $D_0$  随能量密度  $F$  的变化曲线,如图3中虚线所示。

对比实验所得与理论计算的两条曲线,可见实测值  $D$  高于理论值  $D_0$ ,且随着能量密度的增加,  $D_0$  与  $D$  差别越来越大。这是由于当纳秒脉冲激光作用于金属材料时,在激光能量密度大于烧蚀阈值  $F_{th}$  时,  $D_0$  以内的区域材料气化,但同时,在  $D_0$  以外区域的材料,由于热传导,也会发生熔化、甚至气化现象,从而去除部分材料,因此实测凹腔直径  $D$  大于理论值  $D_0$ 。此外,单脉冲能量越大,注入材料的能量越多,热量向四周传导的越多,周围材料气化熔化越多,则  $D$  与  $D_0$  的差值越大。上述原理如图4所示。

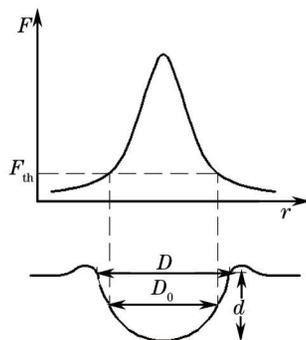


图4 烧蚀凹坑理论值  $D_0$  和实测值  $D$  的形成示意图

Fig.4 Schematic of theoretical value  $D_0$  and measured value  $D$  of micro-crater diameter

### 3.2 能量密度对凹腔深度的影响规律

图5给出了凹腔深度随能量密度的变化关系。从图中可以看出,微凹腔深度变化规律可分为3个阶段: I、II和III。第I阶段,随着激光能量密度增加,凹腔深度逐渐变大;第II阶段,随着激光能量增加,凹腔深度变化趋于平缓;第III阶段,随着激光能量增加,凹腔深度有减小的趋势。这主要是激光烧蚀过程中产生的等离子体对入射激光的强烈吸收导致的。

在实际激光烧蚀金属过程中,表面温度急剧上升,形成大量高温高密度的等离子体。等离子体对入射激光具有吸收作用,其密度越大,吸收率越大。因此,激光穿透等离子体到达材料表面的实际能量密度为

$$F_{inc} = (1 - b)F, \quad (4)$$

式中  $F_{inc}$  为作用于材料表面的实际能量密度,  $b$  是等离子体对激光的吸收率。在烧蚀过程中,靶材的烧蚀深度  $d$  与入射到材料表面的实际能量密度  $F_{inc}$  的关系为<sup>[20]</sup>

$$d = \frac{1}{\alpha} \ln \left( \frac{F_{inc}}{F_{th}} \right), \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为有效系数。将(4)式代入(5)式,可以得到单个脉冲烧蚀深度  $d$  为:

$$d = \frac{1}{\alpha} \ln \left[ (1 - b) \frac{F}{F_{th}} \right]. \quad (6)$$

当能量密度较小(小于  $50 \text{ J/cm}^2$ )时,激光不足以在金属表面形成稠密等离子体,稀薄等离子体对入射激光衰减较小,根据(5)式,微凹腔深度随能量密度增加而增大,这对应于图5中I区;在区域II内,能量密度持续增大(大于  $50 \text{ J/cm}^2$  小于  $200 \text{ J/cm}^2$ ),金属表面稠密等离子体形成,且能量密度越大,等离子体密度越大,对激光能量吸收率  $b$  越大,这会导致实际到达金属表面的能量并没有增大,所以微凹腔深度基本保持平稳;在区域

Ⅲ内,能量密度进一步增大(大于 200 J/cm<sup>2</sup>),稠密等离子体对入射激光的衰减已经大于激光能量的增加,因此微凹腔深度随能量密度的增加反而变小。

当单脉冲能量  $E=0.2$  mJ, 能量密度  $F=14.15$  J/cm<sup>2</sup>时,由于能量密度较小,可以认为材料表面没有形成等离子体,此时,可认为等离子体未对入射激光能量有显著吸收损耗,即吸收率  $b=0$ ,结合(6)式,可以计算为有效系数  $\alpha=0.493$  μm<sup>-1</sup>。根据(6)式,等离子体吸收率  $b$  与输入能量密度  $F$  之间的关系为:

$$b = 1 - \frac{F_{th}}{F} \exp(\alpha d). \quad (7)$$

根据该式,得出不同能量密度下等离子体对激光的吸收率  $b$ ,如图 6 所示。从图 6 可以看出,激光能量密度对等离子体吸收率  $b$  的影响非常大。当能量密度  $F>150$  J/cm<sup>2</sup>时,吸收率  $b>0.8$ ,即大部分的激光能量被等离子体所吸收。由此可见,在激光烧蚀加工过程中,为了获得最高烧蚀加工效率,必须要合理选择输入激光能量密度,以确保激光能量密度处于图 5 中区域Ⅱ。能量密度过小,单次烧蚀凹腔深度过小,激光微织构效率低;能量过大,等离子体屏蔽效应会降低实际作用于金属表面的激光能量密度,激光微织构效率也会显著降低。

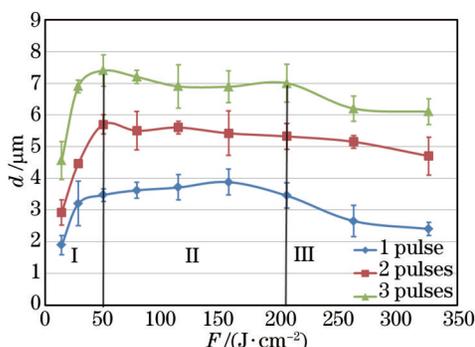


图 5 微凹腔深度随激光能量密度的变化曲线

Fig.5 Micro-crater depths as functions of the laser fluence

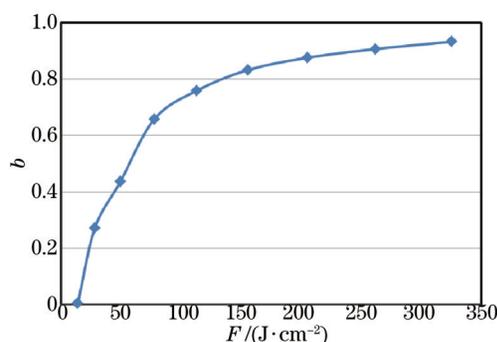


图 6 等离子体吸收率随激光能量密度的变化曲线

Fig.6 Plasma absorption rates as functions of the laser fluence

### 3.3 脉冲个数对凹腔直径和深度的影响规律

由图 3 和图 5 可见,作用脉冲个数对凹腔直径几乎没有影响,但是凹腔深度随作用脉冲个数增加而增加。图 7 为单脉冲能量为 1.1 mJ, 能量密度为 77.85 J/cm<sup>2</sup>时,微凹腔直径、深度随脉冲个数的变化曲线图,该图清晰反映了在上述激光参数条件下,凹腔直径维持在 50 μm 至 60 μm 之间,而微凹腔深度与脉冲个数呈线性关系。实验过程中,发现首个脉冲烧蚀的深度(3.6 μm)比之后每个脉冲作用烧蚀深度(平均为 1.88 μm)大了近一倍,主要原因是:首个脉冲作用的是金属原始表面,激光烧蚀阈值低,烧蚀深度较大,而之后每个脉冲作用的是前一个脉冲烧蚀后的硬化表面,激光烧蚀阈值高,烧蚀深度也就小。

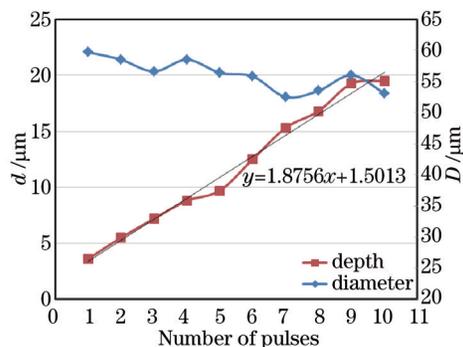


图 7 微凹腔直径与深度随脉冲个数的变化曲线

Fig.7 Micro-crater diameters and depths as functions of number of pulses

图 8 为烧蚀凹腔的 SEM 图、二维(2D)轮廓图及高通滤波轮廓图。从 SEM 图和二维轮廓图,可发现一个明显现象,多脉冲作用后所得微凹腔内部平滑,单脉冲作用所得凹腔底部毛刺较多。为了获得凹腔底部的粗糙度信息,对微凹腔二维轮廓曲线进行高通滤波处理。对高通滤波轮廓数据进行处理,可以得到 1 次脉冲烧

蚀的凹腔底部粗糙度为  $R_{a1}=0.049 \mu\text{m}$ , 而经 3 个脉冲烧蚀的凹腔底部粗糙度为  $R_{a3}=0.034 \mu\text{m}$ , 较 1 次脉冲烧蚀下降了 30.6%。因此, 多个脉冲烧蚀对烧蚀结构形貌具有显著的“平滑”作用。经过反复验证实验, 该现象不是偶然现象, 其原因正在进一步探索中。

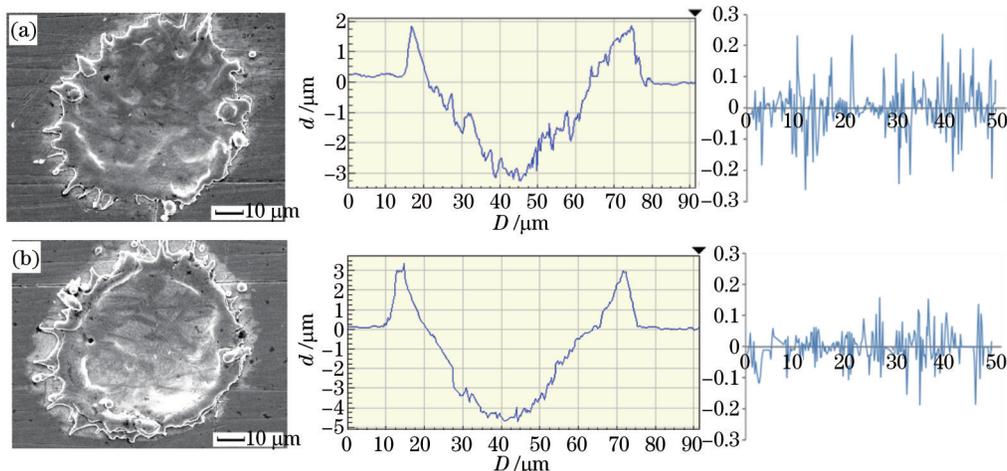


图 8 (a)1 个脉冲和(b)3 个脉冲烧蚀微凹腔的 SEM 图、二维轮廓图及高通滤波轮廓图

Fig.8 SEM micrographs, 2D and high-pass filter profiles of the ablation micro-crater after (a) 1 pulse and (b) 3 pulses

### 3.4 与同点连续多次加工工艺比较

#### 3.4.1 能量密度和脉冲个数影响比较

图 9 给出 SPI 和同点连续条件下凹腔直径和深度随激光能量密度的变化曲线。从图中可以看到同点连续多次加工工艺的凹腔尺寸(直径、深度)随能量密度的变化趋势与 SPI 工艺一致。但是, 在同一能量密度下, SPI 工艺凹腔直径和深度都比同点连续多次凹腔直径和深度略小。

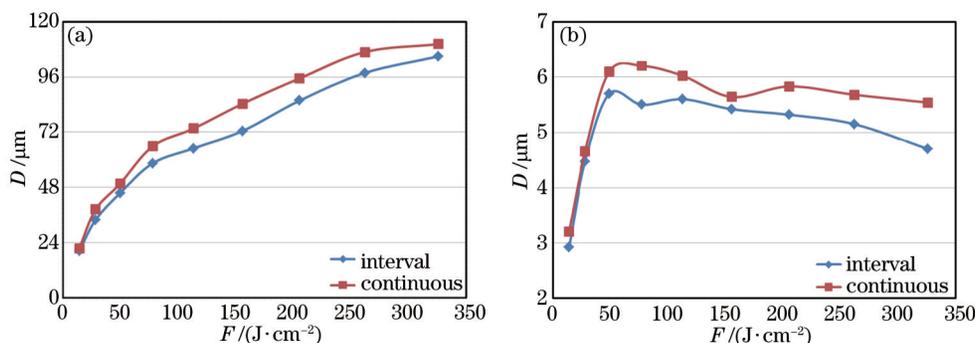


图 9 两种工艺(a)凹腔直径和(b)深度随能量密度的变化曲线

Fig.9 Micro-crater (a) diameters and (b) depths as functions of laser fluence by different processes

图 10 给出针对本文实验所采用的工艺参数, 用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 所得的温度场分布的数值模拟结果。由于实验中激光重复频率为 2 kHz, 因此, 模拟过程中同点连续烧蚀工艺的脉冲作用间隔取为 0.5 ms, 而 SPI 工艺采用的是间隔烧蚀法, 脉冲间隔设定为 200 ms。计算材料为 45 钢, 激光能量密度  $F$  为  $77.85 \text{ J/cm}^2$ , 脉冲宽度为 200 ns。图中虚线为 SPI 工艺, 实线为同点连续多次工艺。由图可见, 无论是沿着凹腔深度方向, 还是沿着凹腔直径方向, 由于 SPI 采用的是间隔烧蚀, 两脉冲时间间隔均远小于同点连续的脉冲间隔, 这极大减弱了脉冲间的热积累效应。两个脉冲后, SPI 间隔烧蚀在径向和深度方向的温度都比同点连续烧蚀的温度小, 这将导致 SPI 加工的凹腔直径和深度都比同点连续加工的凹坑直径和深度都小, 与图 9 所示的实验结果吻合。此外, SPI 工艺对热积累缓解效应, 可在保证加工效率条件下, 最大程度减小热影响区, 控制热致负面效应, 有利于提高微凹腔加工质量。从图 11 可以看出, 较之同点连续加工的微凹腔形貌, SPI 工艺加工的微凹腔形貌底部更加光滑, 四周熔渣毛刺明显减少, 微凹腔质量明显更优。

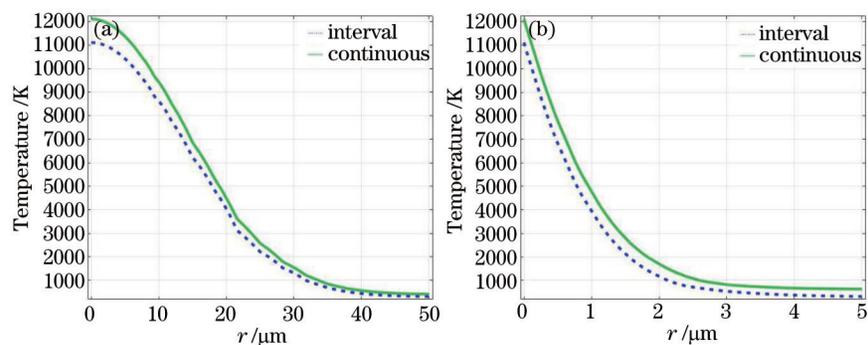


图 10 沿凹腔(a)直径方向和(b)深度方向的温度变化曲线

Fig.10 Temperature variation in (a) axial direction and (b) radial direction of micro-crater

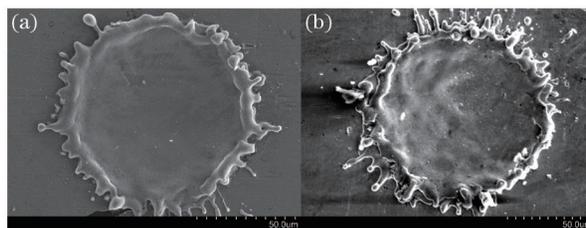


图 11 (a) SPI 工艺与(b)同点连续加工工艺烧蚀微凹腔的 SEM 图

Fig.11 SEM micrographs of the ablation micro-crater after (a) SPI processing and (b) continuous pulses processing

### 3.4.2 SPI 工艺使用效率估计

与同点连续多次工艺相比,SPI 工艺是通过将机械运动与激光脉冲发射匹配耦合,使得激光器在一个加工周期内连续释放脉冲系列,避免重复启停激光系统,极大地提高了微结构的加工效率。以某环面零件为例,激光器重复频率为 2 kHz,每点脉冲个数为 2,加工一圈的点数为 10000 个,SPI 工艺所需的时间为:整个系统启动、停止的时间都为 5 s,20000 个激光脉冲连续释放的时间为 10 s,总时间为 20 s。而同点连续多次工艺所需的时间:在 1 个点激光启动停止所需的时间为 1 s,忽略两个脉冲的作用时间,机械系统从静止状态运动到下个点的时间为 0.5 s,一个点的加工时间为 1.5 s,加工 10000 个点总时间为 15000 s,远超过 SPI 工艺所需时间。

## 4 结 论

系统研究了 SPI 工艺中,激光能量密度和脉冲个数对凹腔尺寸的影响规律,并与同点连续多次工艺对比。研究表明:

- 1) 随着能量密度的增加,微凹腔直径呈对数函数关系增大,脉冲个数对微凹腔直径几乎无影响;
- 2) 随着能量密度增加,微凹腔深度先增大,再保持平稳,最后小幅减小。在激光烧蚀加工过程中,为了获得最高烧蚀加工效率,必须要合理选择输入激光能量密度,以确保激光能量密度处于平稳阶段。随着脉冲个数增加,凹腔深度呈线性增加;
- 3) 根据凹腔直径与激光能量密度之间的关系,得出 45 钢材料的烧蚀阈值为  $6.86 \text{ J/cm}^2$ 。并于文中提出一种等离子体吸收率的测量方法;
- 4) 在相同参数条件下,同点连续工艺比 SPI 工艺具有更显著的热积累效应,这使得 SPI 工艺加工的微凹腔尺寸略小于同点连续工艺;
- 5) SPI 工艺能最大限度降低激光加工产生的负面热效应,且多脉冲作用对微结构内部形貌具有“平滑”作用;同时,在保证单个脉冲材料去除率的条件下,极大提高了激光加工高质量微结构的总效率。

### 参 考 文 献

1 Zhao Wenjie, Wang Liping, Xue Qunji. Development and research progress of surface texturing on improving tribological performance of surface[J]. Tribology, 2011, 31(6): 622-631.  
 赵文杰, 王立平, 薛群基. 结构化提高表面摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(6): 622-631.

- 2 Sung I H, Lee H S, Kim D E. Effect of surface topography on the frictional behavior at the micro/nano-scale[J]. *Wear*, 2003, 254(10): 1019-1031.
- 3 Wang X, Kato K. Improving the anti-seizure ability of SiC seal in water with RIE texturing[J]. *Tribology Letters*, 2003, 14(4): 275-280.
- 4 Etsion I. State of the art in laser surface texturing[J]. *J Tribol*, 2005, 127(1): 248-253.
- 5 Nacer T I, Michel F, Patrick M. Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing[J]. *Tribology International*, 2011, 44(3): 211-219.
- 6 Grabon W, Koszela W, Pawlus P, *et al.*. Improving tribological behaviour of piston ring-cylinder liner frictional pair by liner surface texturing[J]. *Tribology International*, 2013, 61: 102-108.
- 7 Zhang Pengbo, Qin Ying, Zhao Jijun, *et al.*. Two-dimensional numerical simulation of laser-ablation of aluminum material by nanosecond laser pulse[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10): 7120-7128.  
张朋波, 秦颖, 赵纪军, 等. 纳秒激光烧蚀铝材料的二维数值模拟[J]. *物理学报*, 2010, 59(10): 7120-7128.
- 8 Marla D, Bhandarkar U V, Joshi S S. Modeling nanosecond pulsed laser ablation: A focus on temperature dependence of material properties [J]. *Manufacturing Letters*, 2014, 2(2): 13-16.
- 9 Gilbert D, Stoesslein M, Axinte D, *et al.*. A time based method for predicting the workpiece surface micro-topography under pulsed laser ablation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(12): 3077-3088.
- 10 Kong M C, Miron C B, Axinte D A, *et al.*. On the relationship between the dynamics of the power density and workpiece surface texture in pulsed laser ablation[J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2012, 61(1): 203-206.
- 11 Peng Guoliang, Du Taijiao, Liu Feng, *et al.*. Simulation study of laser energy coupling coefficient in the process of ablating glass fiber/epoxy composites[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0203001.  
彭国良, 杜太焦, 刘峰, 等. 激光烧蚀玻璃纤维/环氧树脂复合材料的能量耦合率模拟研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0203001.
- 12 Vilhena L M, Sedlaček M, Podgornik B, *et al.*. Surface texturing by pulsed Nd:YAG laser[J]. *Tribology International*, 2009, 42(10): 1496-1504.
- 13 Su Yongsheng, Li Liang, He Ning, *et al.*. Experimental research on laser machining of surface micro-textures of carbide cutting tool[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0603002.  
苏永生, 李亮, 何宁, 等. 激光加工硬质合金刀具表面微结构的试验研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0603002.
- 14 Su Yongsheng, Li Liang, He Ning, *et al.*. Experiment of laser machining of micro-textures on the surface of polycrystalline diamond[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0803004.  
苏永生, 李亮, 何宁, 等. 聚晶金刚石表面微结构的激光加工实验[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0803004.
- 15 Fu Y, Ji J, Bi Q. Hydrodynamic lubrication of conformal contacting surfaces with parabolic grooves[J]. *J Tribol*, 2012, 134(1): 011701.
- 16 Ji J, Fu Y, Bi Q. The influence of partially textured slider with orientation ellipse dimples on the behavior of hydrodynamic lubrication [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2014, 66(2): 161-167.
- 17 Hua Xijun, Fu Yonghong, Yuan Run, *et al.*. Experimental investigations on laser surface micro-texturing technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(12): 177-180.  
华希俊, 符永宏, 袁润, 等. 激光表面微造型工艺试验与应用[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(12): 177-180.
- 18 Kang Zhengyang, Fu Yonghong, Yin Bifeng, *et al.*. Characterization of partitioned alienation surface texturing on cylinder bore[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2015, 36(1): 93-98.  
康正阳, 符永宏, 尹必峰, 等. 分区异化织构缸孔表面形貌表征[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2015, 36(1): 93-98.
- 19 Liu J M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes[J]. *Optics Letters*, 1982, 7(5): 196-198.
- 20 Vladioiu I, Stafe M, Negutu C, *et al.*. The dependence of the ablation rate of metals on nanosecond laser fluence and wavelength[J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2008, 10(12): 3177-3181.

栏目编辑: 张浩佳