

飞秒激光烧蚀光斑的亮度特征及分形维数

王福斌, 孙志林*

华北理工大学电气工程学院, 河北 唐山 063210

摘要 飞秒激光在微加工过程中衍生的等离子体亮度特征可作为实时反馈的测量信号,因此,研究光斑亮度特征并构造细节信息丰富的高质量亮度变化曲线具有重要意义。首先,针对光斑图像信噪比低、目标区域边缘模糊的情况,采用改进的小波阈值去噪法对光斑图像进行滤波处理,在不改变光斑亮度水平的情况下得到边缘对比度较高的平滑光斑。然后,采用 K 均值聚类方法分割光斑图像,将表现为噪声的光晕部分分割出去,只保留亮度有效的区域。最后,提取光斑序列图像的亮度变化曲线,用分形与多尺度软阈值滤波相结合的方法对曲线进行处理,得到含有丰富细节信息的高质量亮度变化曲线。用不同功率的光斑图像计算亮度与分形维数,结果表明,光斑亮度和光斑变换的复杂性均随激光加工功率的增大而增大。

关键词 超快光学; 飞秒激光; 等离子体光斑; 小波处理; 光斑亮度

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2432001

Brightness Characteristics and Fractal Dimension of Spot Ablated by Femtosecond Laser

Wang Fubin, Sun Zhilin*

School of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China

Abstract The plasma brightness characteristics derived from the femtosecond laser in the micromachining process can be used as real-time feedback measurement signals. Therefore, it is of great significance to study the brightness characteristics of the spot and construct a high-quality brightness change curve with rich details. In this paper, first, in view of the low signal-to-noise ratio of the spot image and the blurred edge of the target area, the improved wavelet threshold denoising method is used to filter the spot image, and a smooth spot with higher edge contrast can be obtained without changing the brightness level of the spot. Then, the K -means clustering method is used to segment the light spot image, and the halo part that appears as noise is segmented out, and only the area with effective brightness is retained. Finally, the brightness change curve of the light spot sequence image is extracted, and the curve is processed by the method of combining fractal and multi-scale soft threshold filtering, and a high-quality brightness change curve with richly detailed information is obtained. The brightness and fractal dimension are calculated using spot images with different powers. The results show that the brightness of the spot and the complexity of the spot transformation both increase with the increase of the laser processing power.

Key words ultrafast optics; femtosecond laser; plasma spot; wavelet processing; spot brightness

OCIS codes 320.2250; 320.7120; 100.7410; 100.2960

1 引言

研究飞秒激光微加工过程中的烧蚀深度时,需

要跟踪样本重复测试预先确定一种合适的加工参数,而加工条件、传输环境及材料性能的变化导致该过程中极易引入误差,从而影响最终的加工结果。

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2020-12-09; 录用日期: 2020-12-17

通信作者: *szl15613567396@163.com

为探寻飞秒激光微加工过程中可以反馈信息的实时测量信号,人们提出用光斑的亮度水平作为指示器,以监测微加工过程的实时状态并进行反馈。Chang 等^[1]通过导出光的亮度与离焦距离之间的关系发现,在飞秒脉冲激光微加工过程中,光源亮度可实时控制烧蚀深度,验证了等离子体光斑亮度可作为反馈调节加工参数的进给。Chen 等^[2]提出了一种利用等离子体光斑亮度变化趋势在线测量铣削深度的方法,实现了对微通道铣削深度的在线测量和调节。因此,促进飞秒激光加工过程的实时反馈研究,对等离子体光斑的亮度特征探索具有重要意义。

等离子体光斑图像受众多复杂因素的影响,不利于亮度特征的提取,因此,在分析亮度特征时,要考虑在不改变原始光斑图像亮度的前提下进行图像处理,并提取光斑有效区域的亮度特征,从而得到随激光加工平台工作时间变化的亮度特征曲线。但该曲线的细节信息提取及噪声的处理比较困难,若想得到含有细节信息的高质量亮度变化曲线,需对光斑图像的亮度曲线细节进行放大再滤波的操作。

本文通过 CCD 相机采集飞秒激光烧蚀单晶硅微结构过程中衍生的等离子体光斑图像,针对图像中目标区域面积过小、信噪比低的特点,对通过图像矩阵扩充变换后的光斑图像采用改进的小波阈值去

噪法进行滤波处理。对比实验结果表明,相比其他方法,本方法对光斑图像的处理效果更平滑。然后,利用 K 均值聚类方法将光斑图像的光晕部分分割出去,只保留光斑亮度有效的区域。提取飞秒激光光斑序列图像的亮度特征变化曲线,采用分形插值与多尺度软阈值滤波相结合的方法,得到平滑且包含丰富细节信息的光斑亮度变化曲线,为等离子体光斑亮度特征的研究奠定了基础。最后,采用分形盒维数计算方法对不同加工功率的光斑图像进行分析,探究了光斑姿态、光斑亮度、光斑边缘复杂程度之间的关系。

2 光斑图像的处理

通过飞秒激光烧蚀 P 型掺杂(硼)单晶硅加工微槽实验,在工作平台匀速加工条件下,利用工业 CCD 相机录制飞秒激光加工过程中等离子体光斑移动的视频(帧率为 30 frame/s)^[3]。将视频图像转化为序列图像,即对每一帧视频提取一个光斑图像,图 1 为激光加工功率为 10 mW 时得到的光斑序列图像。对光斑图像的分析结果表明,光斑的有效区域面积过小,且目标区域边界与背景区分不明显,因此,在进行光斑特征提取前需要对光斑图像进行预处理,得到边界明显、噪声较小的光斑图像,为光斑图像特征的准确提取奠定基础。



图 1 光斑序列图像

Fig. 1 Spot sequence image

2.1 改进的小波阈值去噪法

区域化处理能使边界灰度值偏向于与其相邻区域的灰度,因此,利用图像的逆序延拓,使变换后的图像边界灰度值经区域化处理后更接近原始边界灰度,从而分割得到边界更易区分的原始图像。图像的逆序延拓过程如图 2 所示,其中,图 2(a)为一个尺寸为 200 pixel×200 pixel 的图像,将图 2(a)的每一列进行逆序排列得到图 2(b),组合图 2(b)与图 2(a)得到图 2(c),对图 2(c)的每一行进行逆序排列得到图 2(d),最后将图 2(d)与图 2(c)组合,得到图 2(e),即延拓后的扩充图像。为了观察原始图像在扩充图像中的边界灰度分布情况,标注出图 2(a)在扩充图像图 2(e)中的位置(实线框)。可以发现,

原始图像经扩充后边界相邻位置的灰度都以边界呈对称形态,使利用小窗口平移处理图像(虚线框),即利用边界像素的邻域像素对其进行重新计算及通过图像去噪、增强等方法处理边界时得到较优的处理效果。

由于实验主要分析并提取光斑亮度特征,在光斑图像预处理阶段的去噪方法不能改变原始光斑图像的姿态与亮度。因此,采用改进的小波阈值方法对光斑图像进行滤波去噪处理,并与小波硬、软阈值去噪方法进行对比。结果表明,本方法处理后的光斑图像更平滑,且对目标区域边界的滤波效果更突出。原因是本方法先对光斑图像进行逆序延拓,再通过小窗口平移对扩充后的光斑图像进行小波处理。

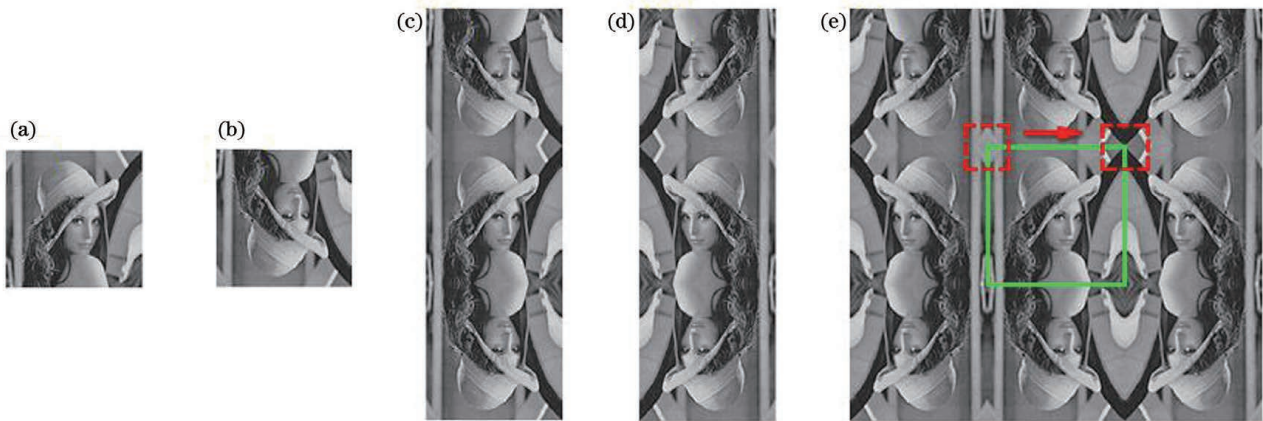


图 2 图像的逆序延拓。(a)原始图像;(b)对原始图像的列进行逆序排列;(c)图 2(a)和图 2(b)的组合图像;(d)对图 2(c)的行进行逆序排列;(e)延拓后的图像

Fig. 2 Reverse order continuation of the image. (a) Original image; (b) arrange the columns of the original image in reverse order; (c) combined image of Fig. 2 (a) and Fig. 2 (b); (d) arrange the rows in Fig. 2 (c) in reverse order; (e) image after extension

采集到的光斑图像为 RGB(Red, Green, Blue) 三通道彩色图像,为了提取光斑图像的亮度特征,分别对原始光斑图像的 R、G、B 通道进行预处理,再进行融合,即用改进的小波阈值去噪方法处理每个通道的图像。含噪信号经小波变换处理后得到的小波系数分为两部分,一部分为低频信号即有效信号的小波系数,数值一般较大;另一部分为高频信号即噪声信号的小波系数,数值一般较小。为了滤除信号的噪声,需要将小于设定阈值的小波系数置为 0,保持大于设定阈值的小波系数或对其进行缩减处理。小波去噪阈值函数通常被分为硬阈值和软阈值两种。硬阈值函数指小波系数的绝对值小于给定阈值时,令其为 0;大于阈值时,小波系数不变。硬阈值处理后的小波系数可表示为

$$W_h = \begin{cases} W, & |W| \geq \lambda' \\ 0, & |W| < \lambda' \end{cases}, \quad (1)$$

式中, W 为小波变换后的小波系数, λ' 为硬阈值函数设定的阈值。软阈值函数指小波系数的绝对值小于给定阈值时,令其为 0;大于阈值时,用其减去阈值^[4]。软阈值函数处理后的小波系数可表示为

$$W_s = \begin{cases} \text{sgn}(W) \times (|W| - \lambda), & |W| \geq \lambda \\ 0, & |W| < \lambda \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $\text{sgn}()$ 为符号函数, λ 为软阈值函数设定的阈值。图 3 为硬阈值与软阈值函数的示意图,可以发现,硬阈值函数在阈值处不连续,导致重构后的信号产生振荡现象;软阈值函数虽然在小波域内连续^[5],但处理后的小波系数与原始小波系数存在恒定偏差,导致重构信号发生严重失真^[6]。

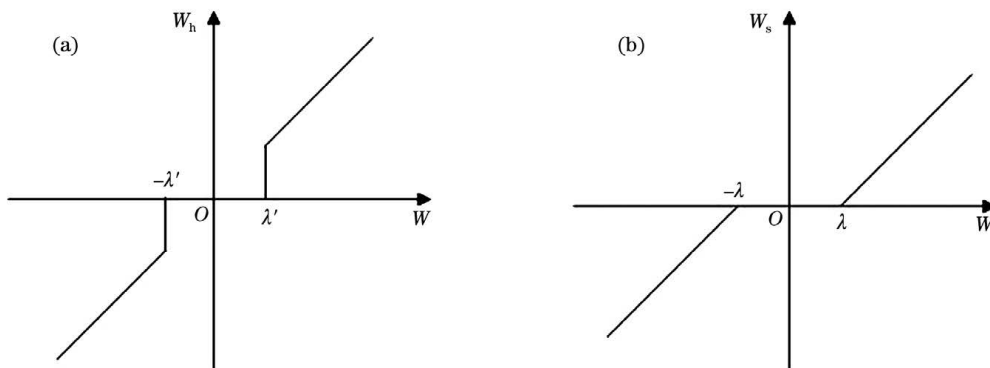


图 3 阈值函数的示意图。(a)硬阈值函数;(b)软阈值函数

Fig. 3 Schematic diagram of the threshold function. (a) Hard threshold function; (b) soft threshold function

本方法中使用的小波阈值去噪过程:首先,用小波基函数对通道图像进行多尺度分解;然后,通过实验确定一组与细节尺度相对应的阈值向量,采用软

阈值去噪,递进更新水平、垂直、对角高频系数经阈值去噪后的小波分解向量;最后,用小波基函数及去噪得到的小波分解结构重构原始图像(软阈值去

噪)。在此基础上,对重构后的图像进行第二次小波分解,用小波基函数及二次小波变换后的分解结构对低频系数进行单支重构,即在阈值去噪的基础上再进行一次低通滤波处理(硬阈值去噪)。对每个通道进行小波去噪滤波后,截取原始光斑图像并进行三通道融合。为了消除小窗口的边界伪影,将光斑图像进行圆形区域均值滤波。

由于激光加工功率设置在 10 mW 时产生的光斑图像目标区域面积过小,是图像处理的难点。为验证本方法的有效性,选择功率为 10 mW 时的光斑图像进行预处理,不同方法得到的光斑图像、彩色分层图像及灰度三维分布图如图 4 所示。其中,

图 4(a)为原始光斑图像及其彩色分层和三维分布,可以发现,原始光斑图像中目标区域与背景边界比较模糊,图像噪声在三维分布图中表现为不平滑的毛刺;图 4(b)为小波硬阈值去噪处理后的图像及其彩色分层和三维分布,可以发现,彩色分层图中目标区域边界部分的画质虽有所改善,但在三维分布图中的处理效果不佳,在像素值相差较大的地方出现了阶梯状分布;图 4(c)为小波软阈值去噪处理后的图像及其彩色分层和三维分布,可以发现,彩色分层图中边界与背景的对比度有所提高,但在三维分布图中存在毛刺,若再次增大处理力度,会造成图像失真,图像亮度信息也会被扭曲;图 4(d)为本方法

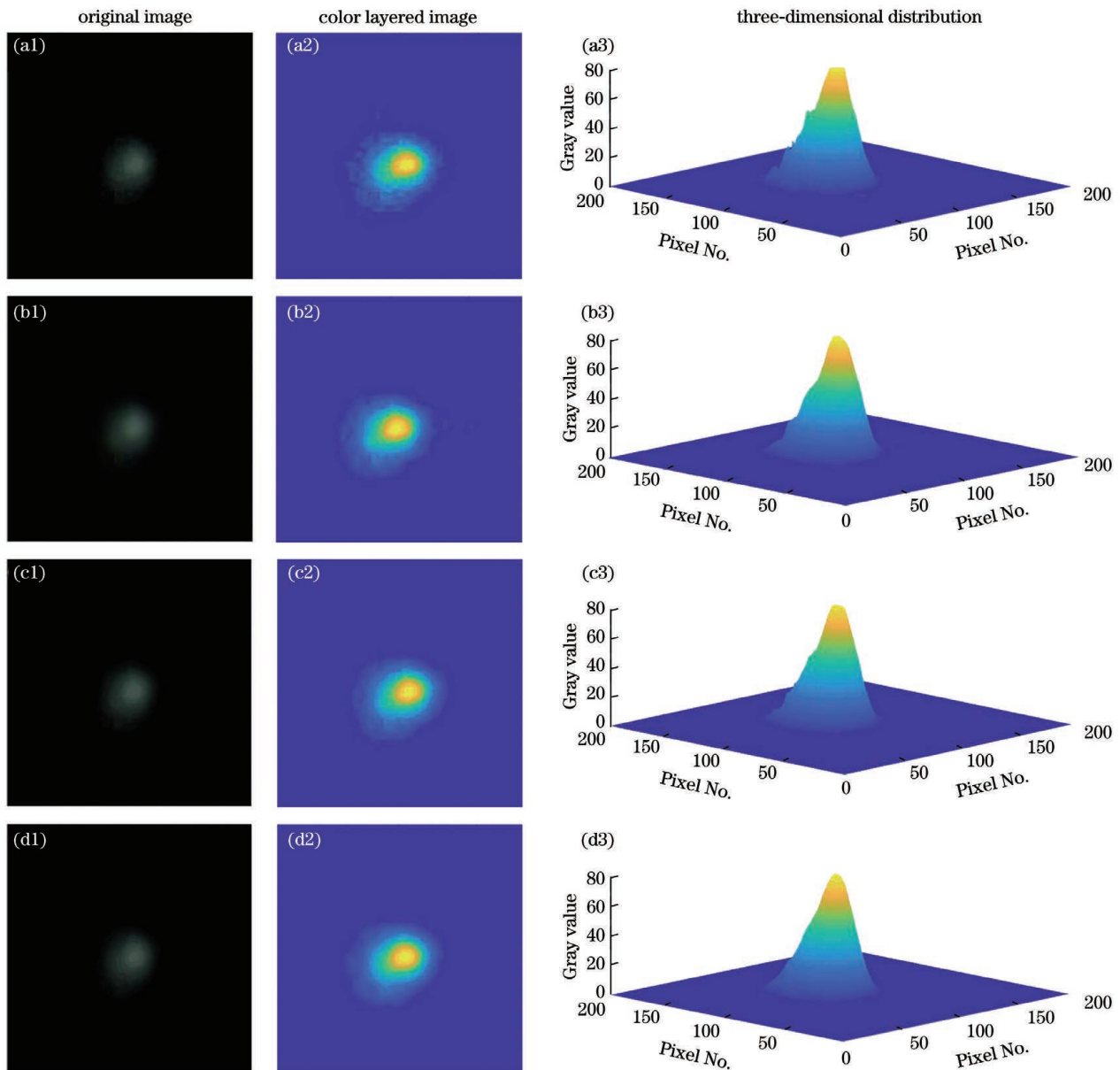


图 4 不同方法得到的光斑效果。(a)原始光斑图像;(b)硬阈值去噪方法;(c)软阈值去噪方法;(d)本方法
Fig. 4 Spot effects obtained by different methods. (a) Original spot image; (b) hard threshold denoising method;
(c) soft threshold denoising method; (d) our method

处理后的图像及其彩色分层和三维分布,可以发现,无论是彩色分层图还是三维分布图,本方法处理后图像的目标区域与背景的对比度都较高,各区域界限分明,三维分布图表面圆滑,噪声滤除效果好,处理后的图像信噪比可达到 52.2 dB。

2.2 K 均值聚类分割

从预处理后的光斑彩色分层图中可以清楚看到,光斑图像根据灰度级别出现的分层与光斑图像的能量分布等级相对应,其中,光斑中心为核心烧蚀区,核心烧蚀区外围主要为光斑过渡区,光晕和拖尾区分不明显,分布在光斑过渡区外围。最外层形似雾状的区域为等离子体消散区,该部分因素复杂多变且与光斑光晕及拖尾部分融合,会给后续光斑特征提取及数据分析带来误差。为了剔除等离子体光晕及拖尾消散区,基于对光斑图像的彩色分层分析结果,提出了一种 K 均值聚类分割方法,以分割出包含信息最丰富的区域。将预处理后的图像转化到 Lab(Luminosity、a、b) 色彩空间中进行 K 均值聚类分割,原因是 Lab 空间中颜色的各分量联系相对较小,有利于颜色的分割。 K 均值聚类分割的具体步骤:1) 随机选择 K 个数据对象作

为聚类中心;2) 计算每个数据对象到聚类中心的欧氏距离,然后将每一个数据对象分配到最近的数据簇中;3) 将全部的数据对象划分到数据簇中后,重新计算聚类中心;4) 循环执行步骤 2) 和步骤 3),直到聚类中心不再进行大范围移动或聚类次数达到要求。

在光斑图像分割过程中,结合光斑的能量分布分析光斑彩色分层图,并观察 K 取不同值时光斑图像矩阵的像素值。结果表明,当 $K=3$ 时,光斑光晕部分的剔除效果较好,可将差值较大的相近像素值全部区分开。因此,在 $K=3$ 时对图 4(d1) 中的光斑图像进行 K 均值聚类分割,结果如图 5 所示。图 5(a1) 和 5(a2) 分别为预处理后的光斑图像及其对应的彩色分层图;图 5(b1) 和图 5(b2) 分别为去掉的等离子体消散部分及其对应的彩色分层图;图 5(c1) 和图 5(c2) 分别为分割得到的光斑有效区域及其对应的彩色分层图。对比发现, K 均值聚类分割方法对光斑图像的处理效果较优,可完整分离光斑光晕及拖尾消散区域,分割后得到的光斑图像细节信息保留完整,可为后续光斑图像的特征提取及分析提供准确的数据支持。

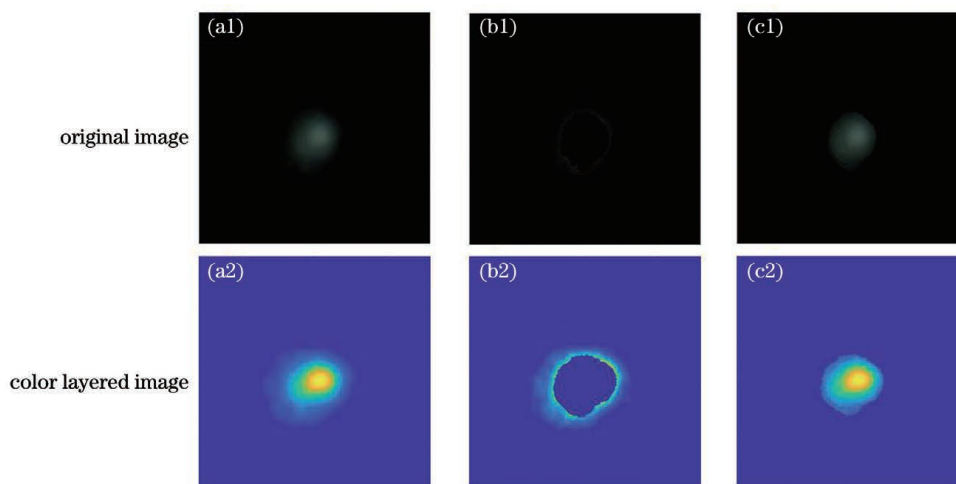


图 5 K 均值聚类方法的分割结果。(a) 预处理后的图像;(b) 光晕及等离子体消散部分;(c) 光斑的有效区域

Fig. 5 Segmentation results of K -means clustering method. (a) Preprocessed image; (b) halo and plasma dissipated part; (c) effective area of the spot

3 光斑图像的亮度特征提取及处理

3.1 单张图像的灰度特征提取及分析

用加工功率为 10 mW 的光斑图像作为处理对象,选择贯穿光斑中心的一条直线,提取直线上所有像素点的 RGB 灰度值并绘制曲线。图 6(a) 为原始光斑图像及其 RGB 灰度分布,可以发现,原始光斑图像的信噪比较低,噪声干扰程度较大;

图 6(b) 为本方法处理后的光斑图像及其 RGB 灰度分布,可以发现,处理后不同通道的灰度值曲线光滑圆润且光斑的灰度值基本保持不变,这表明本方法对图像的去噪滤波效果较优;图 6(c) 为经 K 均值聚类分割后得到的光斑图像及其 RGB 灰度分布,可以发现,分割后的图像在保留原灰度水平的基础上有效剔除了光斑光晕及拖尾消散区域。

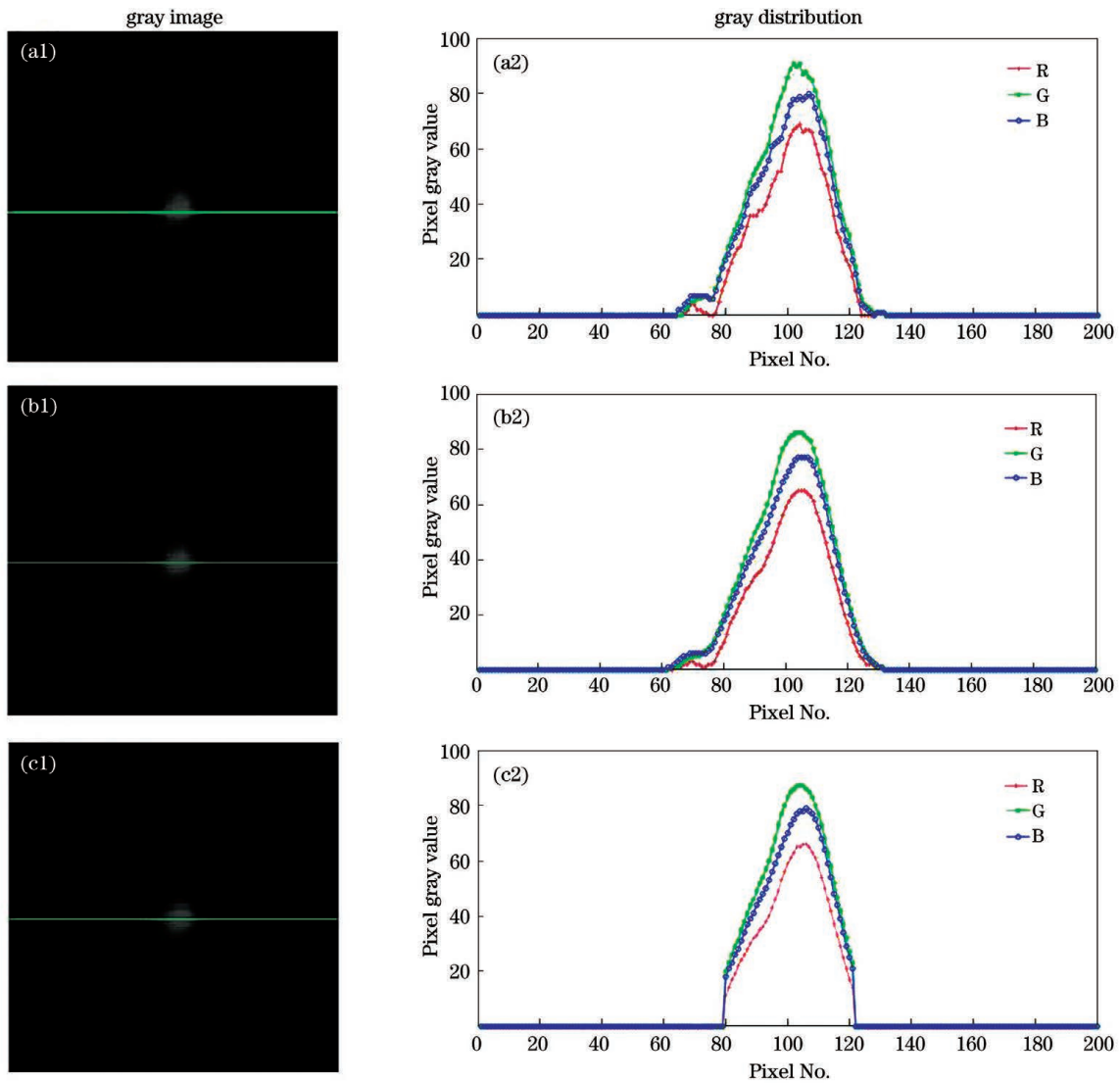


图 6 不同方法处理后的光斑图像和灰度分布图。(a)原始光斑图像;(b)预处理后的图像的;(c)分割后的光斑图像
 Fig. 6 Spot image and gray-scale distribution after processing by different methods. (a) Original spot image;
 (b) preprocessed image; (c) segmented spot image

3.2 光斑序列图像的亮度特征提取及处理

在 RGB 彩色空间上定义的等离子体衍生光斑图像的亮度为^[2,7]

$$X_{\text{Bri}} = \frac{\text{Sum}(R, G, B)}{X_{\text{Area}}}, \quad (3)$$

式中, X_{Bri} 为目标图像的亮度, $\text{Sum}()$ 为光斑图像三通道像素值的总和, R, G, B 分别为图像三个通道的像素值, X_{Area} 为光斑图像的像素面积。

选择飞秒激光在加工功率为 10 mW 时进行单晶硅的烧蚀实验, 利用工业 CCD 相机录制飞秒激光加工过程中等离子体光斑移动的视频, 然后通过视频图像提取 2000 帧光斑序列图像, 对每帧光斑图像进行预处理并计算其亮度, 绘制得到 2000 帧光斑序列图像的亮度特征变化曲线如图 7 所示。可以发

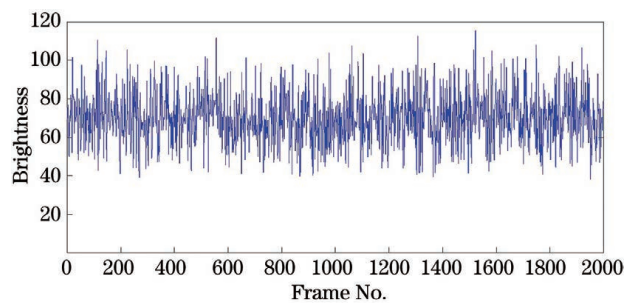


图 7 光斑序列图像的亮度特征变化曲线
 Fig. 7 Brightness characteristic change curve of spot sequence images

现, 随着激光加工中心工作台的往复运动, 光斑图像的亮度也呈周期性变化。

为得到含有丰富细节信息的高质量亮度变化曲线, 结合分形和多尺度软阈值滤波方法对光斑亮度

变化曲线进行处理。为便于观察,从连续 2000 帧序列图像的亮度特征曲线中抽取两个区间(500~

600 frame、1400~1500 frame)的亮度变化曲线进行处理并展示,结果如图 8 所示。

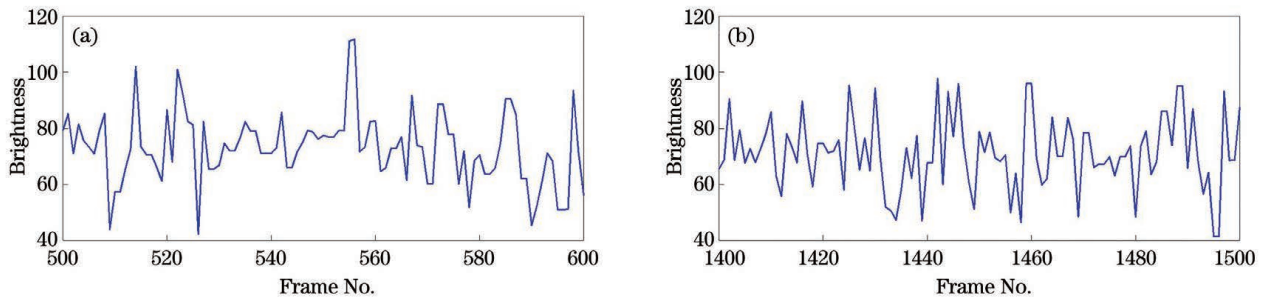


图 8 不同烧蚀区间的光斑亮度变化曲线。(a)500~600 frame;(b)1400~1500 frame

Fig. 8 Brightness change curves of different ablation intervals. (a) 500–600 frame; (b) 1400–1500 frame

为了进一步验证(3)式的适用性,提出了一种光斑图像亮度特征表示方法。将光斑图像转换到 HSL(Hue, Saturation, Lightness)彩色空间,以 L 分量作为光斑图像的亮度图像,用该分量各像素点的灰度值表示原始光斑图像相应的亮度值。计算处

理后每帧光斑图像亮度矩阵的亮度均值并记录,绘制平均亮度特征变化曲线,并与通过(3)式提取的光斑图像亮度曲线进行对比,结果如图 9 所示。可以发现,两种方法的得到的亮度曲线吻合度极高,验证了(3)式的适用性。

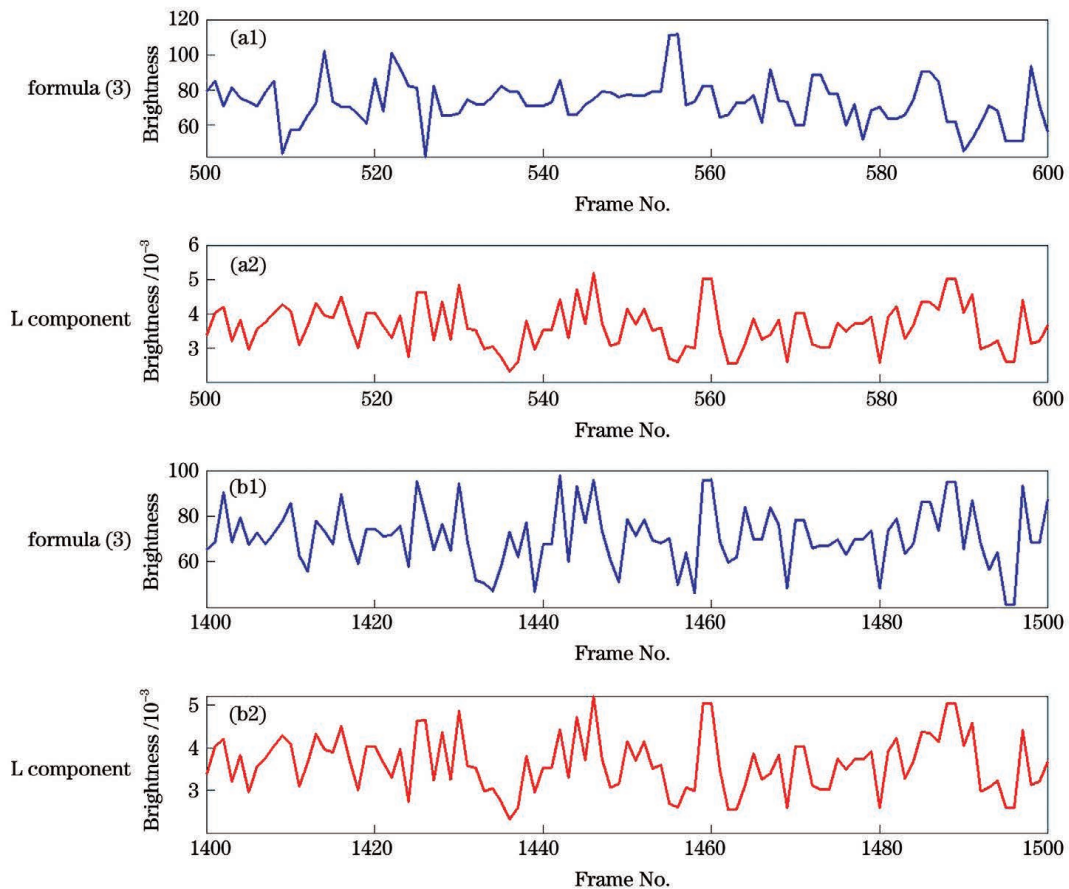


图 9 不同方法提取的亮度变化曲线。(a)500~600 frame;(b)1400~1500 frame

Fig. 9 Brightness change curves extracted by different methods. (a) 500–600 frame; (b) 1400–1500 frame

用一种多尺度软阈值对光斑亮度曲线进行滤波处理,其本质是一种改进的小波变换方法。在多尺度小波分解后,每一层高频系数的标准差可表示为

$$e = \frac{\text{Med}(H_{fc})}{0.6745}, \quad (4)$$

式中, H_{fc} 为高频系数, Med 为取中值函数。每层的

滤波阈值可表示为

$$X_{thr} = e \sqrt{2 \log N_1}, \quad (5)$$

式中, N_1 为信号长度。由于软阈值处理的曲线更平滑, 因此, 用上述确定的阈值对每层进行软阈值去噪。使用的小波基函数“sym8”是 db 函数的一种改进函数, 具备较好的正则性, 相比 dbN 小波, 具有更好的对称性, 可在一定程度上减少分析和重构信号

时的相位失真。最后, 通过多尺度重构得到姿态更贴近原始曲线的平滑曲线。

图 10 为 500~600 frame、1400~1500 frame 两个区间的光斑亮度特征变化曲线经小波变换的硬阈值去噪、常用软阈值去噪及多尺度软阈值去噪的处理结果。可以发现, 本方法处理后的曲线更接近原始曲线; 且对于起伏大、不平稳的信号, 本方法的处理效果更好。

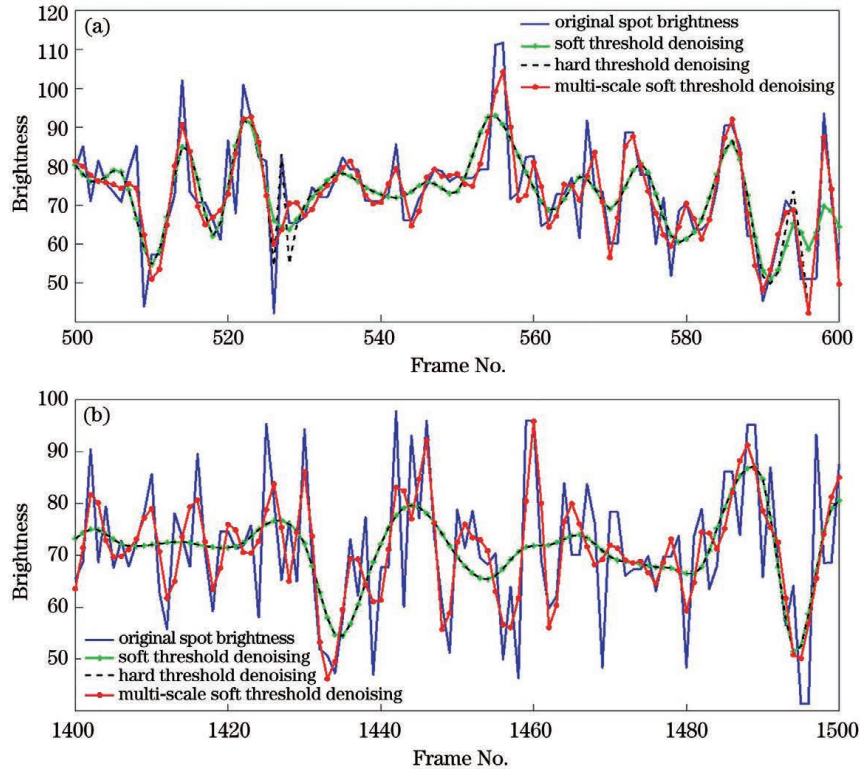


图 10 不同方法的去噪结果。(a)500~600 frame;(b)1400~1500 frame

Fig. 10 Denoising results of different methods. (a) 500–600 frame; (b) 1400–1500 frame

从图 10 可以发现, 无论哪种去噪方法都会导致原始曲线细节部分丢失严重。因此, 结合分形插值与多尺度软阈值滤波对原始亮度曲线进行处理。首先, 利用分形插值放大光斑亮度曲线的细节, 再利用多尺度软阈值滤波对其进行去噪处理, 从而构造细节信息丰富的光滑亮度特征变化曲线。分形插值函数的定义: 给定二维平面上的一组数集 $\Delta = \{(x_i, y_i) | i=0, \dots, N\}$, $I = [x_0, x_N]$, $P = I \times [a, b]$, 令 $I_i = (x_{i-1}, x_i)$, $i = 1, \dots, N$ 满足 $L_i(x_0) = x_{i-1}$, $L_i(x_N) = x_i$ 和 $F_i(x_0, y_0) = y_{i-1}$, $F_i(x_N, y_N) = y_i$ 。其中, (x_i, y_i) 为点集, i 为任意常数, N 为大于 1 的整数, I 为 X 轴上的任意区间, I_i 为 I 的子区间, P 为二维空间, a, b 均为常数。定义一个映射 $\omega_i: P \rightarrow P$, 可表示为

$$\omega_i \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_i(x) \\ F_i(x, y) \end{bmatrix}, i = 1, \dots, N, \quad (6)$$

式中, $L_i(\cdot)$ 为压缩同胚, $F_i(\cdot)$ 为连续函数, 则映射 $\{P, \omega_i\}$ 可构成一个迭代函数系统^[8]。

文献[9]中的定理 1 表明: 存在 I 上的连续函数 $f(x)$ 满足

$$G = \{[x, f(x)] | x \in I\}, \quad (7)$$

式中, G 为 $f(x)$ 的图像, x 为自变量, $f(x)$ 为迭代函数系统 $\{P, \omega_i\}$ 的不变集, 即 $G = \bigcup_{i=1}^N \omega_i(G)$ 且 $f(x_i) = y_i$, 称 $f(x_i)$ 为对应 $\{P, \omega_i\}$ 的分形插值函数。

当 $L_i(x)$ 和 $F_i(x)$ 都取线性函数时, (6) 式可表示为

$$\omega_i \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_i & 0 \\ c_i & d_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_i \\ f_i \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中, a_i, c_i, d_i, e_i, f_i 均为常数。根据 $\omega_i(x_0, y_0) = (x_{i-1}, y_{i-1})$, $\omega_i(x_N, y_N) = (x_i, y_i)$, 得到

$$\begin{cases} a_i x_0 + e_i = x_{i-1} \\ a_i x_N + e_i = x_i \\ b_i x_0 + s_i y_0 + f_i = y_{i-1} \\ b_i x_N + s_i y_N + f_i = y_i \end{cases}, \quad (9)$$

解得

$$\begin{cases} a_i = (x_i - x_{i-1}) / (x_N - x_0) \\ e_i = (x_N x_{i-1} - x_0 x_1) / (x_N - x_0) \\ c_i = (y_i - y_{i-1}) / (x_N - x_0) - d_i (x_N y_0 - x_0 y_N) / (x_N - x_0) \\ f_i = (x_N y_{i-1} - x_0 y_i) / (x_N - x_0) - d_i (x_N y_0 - x_0 y_N) / (x_N - x_0) \end{cases} \quad (10)$$

以 500~600 frame、1400~1500 frame 两个区间的光斑亮度特征变化曲线作为研究对象,用分形和多尺度软阈值去噪相结合的方法处理两区间的光斑亮度曲线。为验证结合分形和多尺度软阈值去噪方法的有效性,对比了处理前后的光斑亮度特征曲线,结果如图 11 所示。可以发现,原始

亮度曲线尖锐及趋平部分经处理后均变得圆润光滑,而原始亮度曲线的平缓区域处理后表现为丰富的细节信息。这表明结合分形和多尺度软阈值去噪处理得到的光斑亮度曲线不仅平滑圆润且极大程度保留了原光斑亮度曲线的细节信息。

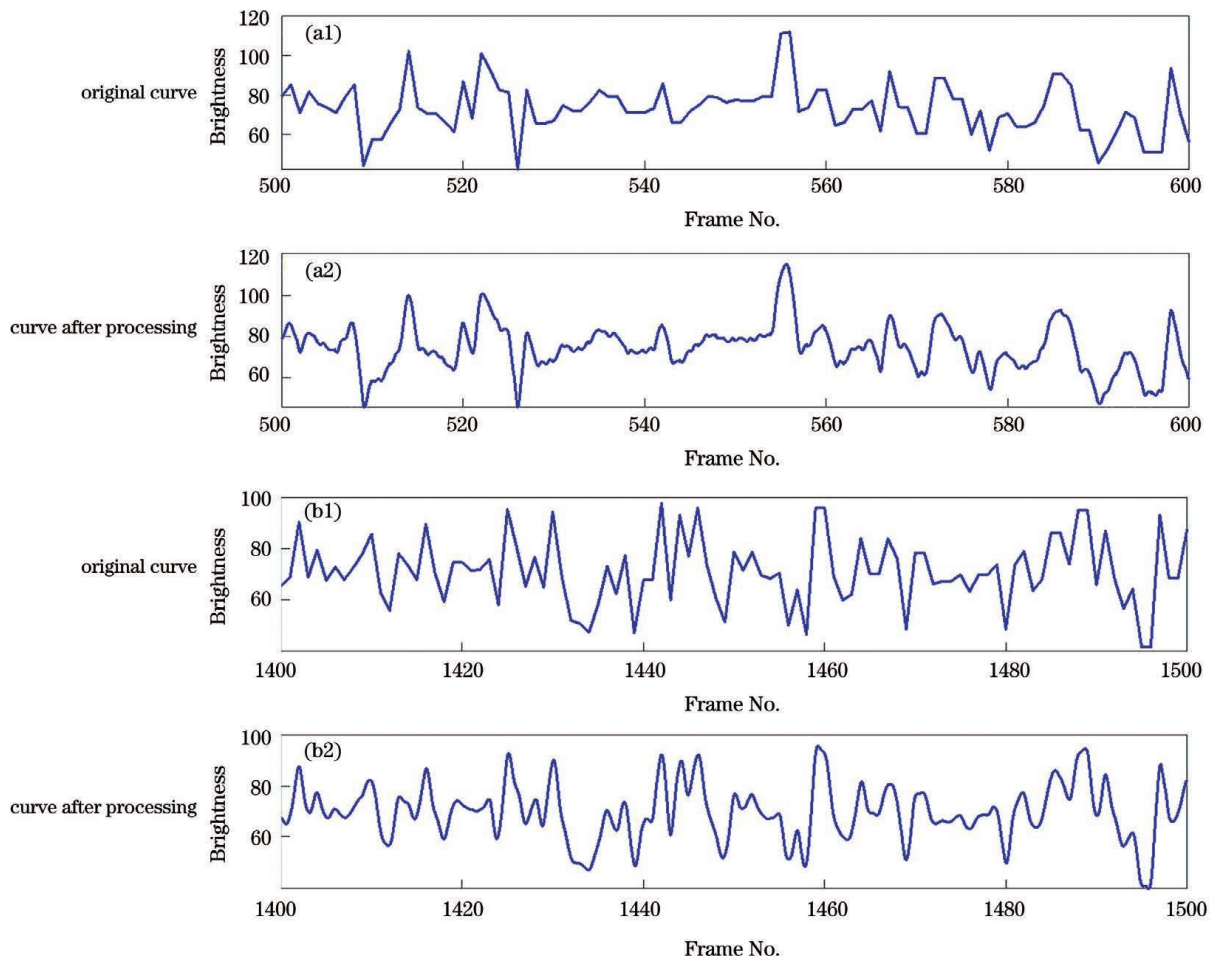


图 11 结合分形和多尺度软阈值去噪的处理结果。(a)500~600 frame;(b)1400~1500 frame

Fig. 11 Processing result of the combination of fractal and multi-scale soft threshold denoising. (a) 500–600 frame; (b) 1400–1500 frame

4 光斑图像的亮度特征及复杂度分析

分形几何在描述自然界中存在的大量不规则物体方面有巨大的优势,被称为大自然的几何学。面对一些非光滑、不规则、剧烈振荡的对象,分形插值可作为强有力的解决工具。分形维数是分形几何中研究的主要对象,也是描述图像粗糙度的一个重要参数,可用来刻画一个几何体的复杂程度。盒维数具有定义直观、计算简便的特点^[10],在分形维数中得到了广泛认可。

4.1 工作平台运动过程中的光斑形态

实验中加工平台的运动方式:平台沿 Z 方向的焦距固定不变,焦点落在物体表面;移动平台,使其沿 X 方向从右到左进行匀速运动,直到工件到达该方向的最左侧,运动平台在 Y 方向有一个微小偏移后,再使其沿 X 方向返回,从而进行从左到右的匀速运动,当平台在该方向最右侧向 Y 方向进行微小偏移时为一个加工周期。此时,运动平台会再沿 X 方向进行下一个周期的匀速运动,重复上述操作,直到完成所需微槽尺寸的要求。

由于 50 mW 的光斑图像光斑面积所占区域较大,光斑拖尾方向明显,因此,选用该功率下有代表性的光斑图像进行分析。图 12 为加工平台运动过程中某一周期内不同烧蚀阶段产生的光斑图像。当加工平台完成一个周期的循环,激光束到达平台最右端时,产生的光斑图像如图 12(b)所示,继续开始

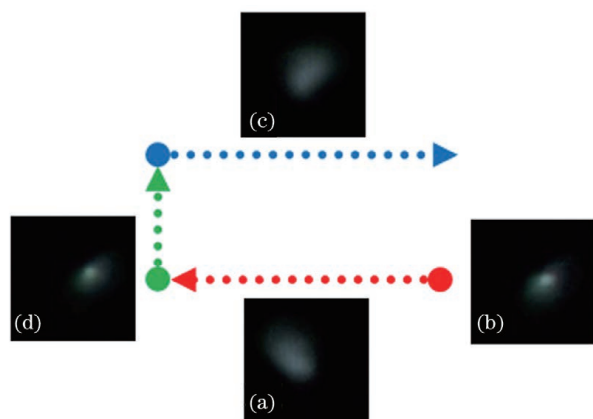


图 12 加工平台运动过程中的光斑形态。(a)从右到左的运动过程;(b)最右端的光斑形态;(c)从左到右的运动过程;(d)最左端的光斑形态

Fig. 12 Shape of the spot during the movement of the processing platform. (a) Movement process from right to left; (b) spot shape at the far right end; (c) movement process from left to right; (d) spot shape at the far left end

下一周期的移动,工作平台从右到左移动时伴随的光斑图像如图 12(a)所示,激光束到达平台最左端时产生的光斑图像如图 12(d)所示,工作平台向 Y 轴进给后从左到右运动过程中伴随的光斑图像如图 12(c)所示。由于工作平台在 X 方向上运动,核心烧蚀区均分布在 X 方向上,光斑形态比较稳定,因此,实验均以类似图 12(a)和图 12(c)中稳定的光斑形态分析光斑的复杂度。

4.2 不同功率光斑的亮度及复杂度分析

盒维数是分形几何测量中的基本方法,在测量时取边长为 γ 的小盒子将分形体包裹起来,由于包裹过程中分形体存在空洞和裂隙,因此存在空盒子。计算实盒子的数量并记为 $N(\gamma)$,然后减短盒子的边长 γ ,此时, $N(\gamma)$ 的值必然会增大。根据定义在双对数坐标图上绘制 $\ln N(\gamma) - \ln \gamma$ 曲线,此时的斜率即为盒维数^[11]。

实际烧蚀过程中,随着工作平台向左运动,激光脉冲位置固定不动,相当于微结构向右侧烧蚀;当工作平台向右运动时,相当于微结构向左侧烧蚀,导致一个加工周期内稳定烧蚀状态下 X 方向上的光斑拖尾方向相反。分别取功率为 10 mW、20 mW 及 50 mW 时激光束在 X 方向上的两种稳定形态光斑序列图像进行分析,各功率下取工作平台向左运动时产生的 100 帧图像以及工作平台向右运动时产生的 100 帧图像,即每种功率取 200 帧光斑图像,共 600 帧图像作为实验样本。对各功率下不同方向的 100 帧图像进行边缘提取,并计算 100 个样本的平均亮度及盒维数,结果如表 1 所示。可以发现,10 mW 加工功率下的光斑亮度最小,盒维数最小;而功率为 50 mW 的光斑图像亮度最大,盒维数最大。这表明光斑亮度和光斑边缘复杂性随激光加工功率的增大而增大。文献[12]绘制了飞秒激光功率与铜层刻蚀区域深度和粗糙度的关系曲线,文献[13]通过实验验证了飞秒激光加工微孔的深度在相同加工时间下随加工功率的升高而增大,且变化趋势随加工时间的延长愈加显著。这些研究均表明激光烧蚀功率越大,激光烧蚀深度越深。

利用飞秒激光烧蚀 P 型掺杂(硼)单晶硅片,加工出 13 组硅片切槽,每组切槽加工 3 个。通过改变激光烧蚀功率获得等离子体光斑图像和 39 个微槽的平均加工深度与烧蚀功率的对应关系,结果如表 2 所示。可以发现,烧蚀功率越大,激光烧蚀微槽越深。结合激光与材料相互作用的过程发现,当激光束到达材料表面的聚焦中心时,材料中的自由电

表 1 不同功率光斑的亮度及复杂度分析

Table 1 Analysis of brightness and complexity of different power light spots

Power /mW	Spot image	Color layered map	Light spot edge	Brightness	Box dimension
10				52.8723	1.0893
10				33.4346	1.1235
20				61.8334	1.2234
20				70.4779	1.2402
50				74.1101	1.2748
50				80.3970	1.2527

表 2 硅片微槽烧蚀实验参数

Table 2 Ablation experimental parameters of silicon microchannels

Number of grooves	Ablation power /mW	Average slot depth / μm
39	10	23
39	50	108

子通过吸收激光光子能量并将其转化为动能,从物体表面喷射而出,形成可监测的等离子体。这表明烧蚀微槽越深,材料去除部分越大,喷射出的等离子体在光斑图像上的表现就越明亮。喷射过程受环境中温差、粉尘颗粒、光照强度等复杂因素的影响,使等离子体形成的光斑边缘结构复杂多变,进一步验证了激光烧蚀功率越大,光斑亮度越大,光斑边缘复杂度越大的结论。

综上所述,等离子体亮度信息与烧蚀深度存在关联,文献[3]的研究也证明了光斑亮度与功率间的相关性极强。因此,可将等离子体亮度作为激光烧蚀过程中的深度反馈信号,通过实时监测光斑图像的亮度水平微调加工功率,使烧蚀深度维持在一个稳定的范围内,从而提高微加工工艺的精度。相比单一参数控制法重复实验进行的微加工,通过等离子体亮度信息反馈加工深度并实时调整加工功率进行修正的加工过程更合理。

5 结 论

对通过图像矩阵扩充变换后的光斑图像采用改进的小波阈值去噪方法进行滤波处理,并与小波软、硬阈值去噪方法的效果进行对比,结果表明,本方法可在不改变原始光斑图像亮度的情况下使光斑图像变平滑,且对目标区域边界的滤波效果更突出。用

K 均值聚类分割方法对光斑图像进行处理,使光斑光晕及拖尾消散区域被完整分离出去,保留了有效信息丰富的光斑区域。然后,通过提取光斑序列图像的亮度特征,结合分形和多尺度软阈值去噪方法得到的亮度曲线不仅平滑圆润且极大程度保留了原始光斑亮度曲线的细节信息。最后,分析了不同功率下光斑的亮度及复杂度,结果表明,随着激光加工功率的增大,光斑亮度也不断增大,光斑边缘的复杂性也随之变大。这表明等离子体亮度可作为激光烧蚀过程中的深度反馈信号,用于实时检测加工过程中的光斑状态,并通过检测亮度水平调节烧蚀功率,从而达到需要的加工深度,对激光微加工过程中闭环控制的实现具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Chang G, Tu Y L. Closed-loop control in ultrafast laser milling process using laser triggered plasma[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 60: 35-39.
- [2] Chen J X, Zhou X L, Lin S W, et al. A prediction-correction scheme for microchannel milling using femtosecond laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 91: 115-123.
- [3] Liu Y. Study on the classification of femtosecond laser spot images based on manifold learning and ELM[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2019: 9-10.
刘洋. 流形学习结合 ELM 的飞秒激光光斑图像分类研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2019: 9-10.
- [4] Fu G J, Wang Y, Ren J, et al. Denoising algorithms based on wavelet for pools underwater image [J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2013, 32(6): 65-68.
付光杰, 王依, 任娇, 等. 基于小波的泳池水下图像去噪算法研究[J]. *自动化技术与应用*, 2013, 32(6): 65-68.
- [5] Yao D, Zheng K Y, Liu Z D, et al. Wavelet denoising in near-infrared broadband cavity-enhanced absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0930006.
姚丹, 郑凯元, 刘梓迪, 等. 用于近红外宽带腔增强吸收光谱的小波去噪[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0930006.
- [6] Zhang J W, Feng Y, Li W. Research on wavelet denoising method based on an improved threshold function[J]. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(9): 137-140, 144.
张金武, 冯毅, 李文. 基于一种改进阈值函数的小波去噪方法研究[J]. *电子设计工程*, 2017, 25(9): 137-140, 144.
- [7] Wang F B, Li X, Wu C, et al. Integrated wavelet processing for plasma spot image produced from femtosecond laser ablating silicon wafer [J]. *Laser Journal*, 2017, 38(11): 93-96.
王福斌, 李鑫, 武晨, 等. 飞秒激光烧蚀硅晶等离子体光斑集成小波处理[J]. *激光杂志*, 2017, 38(11): 93-96.
- [8] Zhang B B. The differentiability of fractal interpolation function[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017: 6-7.
张彬彬. 分形插值函数的可微性[D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 6-7.
- [9] Sha Z, Ruan H J. Fractal and fitting[M]. Xu S J, Transl. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005: 124-128.
沙震, 阮火军. 分形与拟合[M]. 徐素君, 译. 杭州: 浙江大学出版社, 2005: 124-128.
- [10] Liu H Y. Calculation method of box dimension of computer image[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2015(20): 87-88.
刘宏逸. 计算机图像的盒维数计算方法[J]. *电子技术与软件工程*, 2015(20): 87-88.
- [11] Wang Q H. Research on fault diagnosis for hydraulic system based on fractal theory[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2004.
王庆华. 基于分形理论的液压系统故障诊断技术研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2004.
- [12] Zhang X, Liu K, Wang M D, et al. Etching technology for copper-clad laminates based on femtosecond laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1214003.
张晓, 刘凯, 王明娣, 等. 基于飞秒激光的覆铜板蚀工艺[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1214003.
- [13] Lü J, Wang H J, Cao Z, et al. Synergistic effect of microstructure on green femtosecond laser machining behavior of ZrO₂ ceramics[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2020, 49(2): 305-311, 330.
吕健, 王宏建, 曹佐, 等. ZrO₂ 陶瓷显微结构对绿光飞秒激光加工过程的协同效应[J]. *人工晶体学报*, 2020, 49(2): 305-311, 330.