

激光与光电子学进展

非平整表面飞秒激光加工方法及应用

何煦¹, 马云灿^{1*}, 李军¹, 袁鸣洲², 尹美芳², 孟立民¹, 叶雁¹, 张航¹, 吴军²¹中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900;²深圳市第二人民医院烧伤整形科, 转化医学研究院, 广东 深圳 518035

摘要 飞秒激光加工技术主要是利用激光焦点对材料进行微区去除, 结合加工路径的精准规划和激光参数的精确调控, 实现各种功能微结构的精密加工。然而, 在实际加工过程中, 材料表面并非都是理想平面, 这引起激光焦点与材料表面的相对距离发生变化, 导致材料表面接收的激光焦斑尺寸不一致, 进而造成飞秒激光加工的微结构不均匀, 最终不满足某些应用场景的实际需求。针对该问题, 提出了基于分区域平面拟合和二维插值的两种校正方法, 即在待加工区域内以少量采样点近似描述材料表面起伏形貌, 并以此为依据校正加工路径的高度坐标, 使飞秒激光加工过程中激光焦点和材料表面的相对距离控制在不影响加工效果的范围内。试验结果表明, 这两种校正方法都能保证飞秒激光加工大面积微结构的均匀性和一致性, 是解决非平整表面不易实现高品质微结构加工的有效方法。

关键词 飞秒激光; 精密加工; 非平整表面; 分区拟合; 二维插值

中图分类号 V261.8

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222408

Method and Application of Femtosecond Laser Processing on Non-Flat Surfaces

He Xu¹, Ma Yuncan^{1*}, Li Jun¹, Yuan Mingzhou², Yin Meifang², Meng Limin¹, Ye Yan¹,
Zhang Hang¹, Wu Jun²¹Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;²Department of Burn and Plastic Surgery, Institute for Translation Medicine, Shenzhen Second People's Hospital, Shenzhen 518035, Guangdong, China

Abstract The femtosecond laser processing technology primarily uses the laser focus to eliminate the microzone of the material. The exact processing of diverse functional microstructures is possible when combined with the precision design of the processing route and fine laser parameter control. However, during processing, the material's surface is not always in an ideal plane, which changes the distance between the laser focus and the material's surface. This results in the material's surface receiving a laser focal spot of varying sizes, which causes the microstructure of femtosecond laser processing to be uneven and, ultimately, does not meet the requirements of some applications. To address this problem, two calibration methods based on sub-region plane fitting and two-dimensional interpolation are proposed. First, the surface topography of the material is approximately described by a small number of sampling points in the area to be processed. Based on this, the processing path's height coordinates are adjusted to ensure that the processing impact is not adversely affected by the relative distance between the laser focus and the material surface during femtosecond laser processing. The experimental results demonstrate that these two calibration techniques are efficient ways to address the issue that non-flat surfaces make it challenging to achieve high-quality microstructure processing by femtosecond laser. They can ensure the uniformity and consistency of large-area microstructures processed by femtosecond laser.

Key words femtosecond laser; precise processing; non-flat surfaces; sub-region fitting; two-dimensional interpolation

1 引言

飞秒激光具有极短的脉冲持续时间和极高的峰值

功率, 利用显微物镜头^[1]、平场透镜^[2]、离轴抛物面镜^[3]等光学元件聚焦后, 其焦斑尺寸可被压缩至 μm 级, 对应峰值功率密度 (TW/cm^2) 超过自然界任意固体材料

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-09-24; 录用日期: 2022-10-09; 网络首发日期: 2022-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(11704357)、冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金(2021JCJQLB05707)、表面物理与化学重点实验室基金(6142A02200404)

通信作者: *mayuncan@caep.cn

的光学损伤阈值。同时,飞秒激光的脉冲持续时间小于热效应时间,它与材料相互作用时产生的热效应基本可以忽略。因此,飞秒激光可实现任意固体材料的微区精准去除,结合激光焦点与样品之间相对运动的路径规划,可实现不同功能微结构精密加工。自 20 世纪 90 年代飞秒激光被应用于材料的加工和处理以来^[4],国内外研究团队面向各种场景的应用需求,实现了各类功能微结构的设计和加工,如:1)面向大视场高品质成像的实际需求,人们利用飞秒激光加工技术与化学湿法刻蚀或离子束干法刻蚀技术相结合的方法,制备了具有人工复眼功能的微透镜阵列结构^[5-9];2)面向材料表面自清洁、防水、防冰等实际需求,人们受自然界荷叶结构的启发,利用飞秒激光加工技术在各种材料上制备了具有超疏水功能的微纳结构^[10-13];3)面向同步辐射光源和自由电子激光等大科学装置对高亮度强相干 X 射线光束的高品质聚焦需求,人们利用飞秒激光加工技术在超硬金刚石材料上制备了复合折射率透镜光学元件^[14-17];4)面向光量子高速计算对三维光学波导的实际需求,人们利用飞秒激光加工技术在透明材料内部制备了光量子计算芯片^[18-21]。近年来,随着飞秒激光器相关技术的发展,其稳定性和可靠性显著提升,飞秒激光加工技术正在朝着实用化阶段发展,并逐渐演变成为一种精密加工的重要手段。

在飞秒激光加工过程中,激光焦点与材料表面的相对距离能否保持一致或控制在可接受的误差范围内,直接影响飞秒激光加工的微结构是否具备较好的均匀性和一致性。常见报道的试验研究^[22-24]中,通常选择表面平整度较高或近乎光滑的原材料以消除表面不平整对加工效果造成的负面影响,保证加工过程中激光焦点始终与材料表面保持相对固定的距离,进而实现高品质均匀微结构的加工。然而,在大多数实际应用场景中,待加工材料的表面并非理想的光滑平面,飞秒激光加工过程中激光焦点与材料表面的相对距离必然发生变化,这使得材料表面累积的激光能量不均匀,导致加工的微结构均匀性和一致性较差,影响微结构在相关应用场景的功能实现。使用追焦系统对前述激光焦点与材料表面相对距离的变化进行补偿,其优势在于可实时测量与校正,且可对材料在加工过程中发生形变而导致的相对距离变化做出实时响应。该系统对硬件和软件有较高的要求,以满足实时测量、计算、运动补偿等系列流程的响应速度和精度需求,且存在加工过程对测量产生干扰、校正滞后等问题。因此,对于非平整表面的飞秒激光加工而言,如何确保样品表面焦斑尺寸的一致性以获得均匀可控的加工效果,是亟需关注和解决的问题。

为解决上述问题,本文提出了分区域平面拟合和二维插值的两种校正方法,基本思路是:飞秒激光加工试验开始前,通过少量采样点对材料表面的起伏进行分析,基于分区域平面拟合或二维插值的计算结果,调

整加工路径的高度坐标,使激光焦点与材料表面的相对距离控制在不影响加工效果的范围内,保证飞秒激光加工过程中样品表面接收的焦斑尺寸一致,进而实现大面积均匀微结构的加工。

2 试验设备及方法

2.1 试验设备

飞秒激光加工系统的试验光路如图 1 所示,该系统由飞秒激光器激光束传输模块、光学显微镜、高精度三维位移台等部分组成。飞秒激光器是开展加工试验的能量源,主要参数如下:中心波长为 1030 nm,脉冲宽度为 400 fs,最大单脉冲能量为 200 μ J,重复频率为 200 kHz。光束传输模块是实现飞秒激光束传输的基本单元,它由反射镜、光阑、衰减器、机械快门等元器件构成,反射镜用于调节激光束传输指向,光阑用于实现飞秒激光束准直,衰减器用于调控激光功率,电控快门用于控制激光束的通与断。光学显微镜是实现激光束聚焦和在线监测的重要单元,其物镜头主要用于实现飞秒激光束的聚焦,当物镜头与同轴 CCD 相机配合使用时,可对飞秒激光加工过程进行在线监测。高精度三维位移台是实现样品精密运动的核心部件,主要参数如下:行程为 $X \times Y \times Z = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 、绝对定位精度为 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 、重复定位精度为 $\pm 0.03 \mu\text{m}$ 。

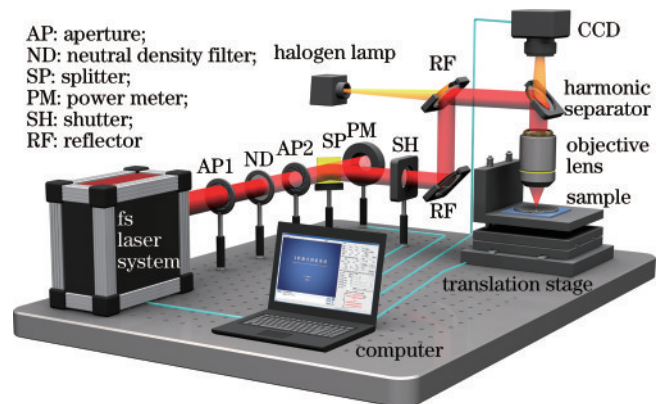


图 1 飞秒激光加工试验装置图

Fig. 1 Experimental setup for femtosecond laser processing

利用自主研发的飞秒激光加工系统控制软件,实现了电控快门、高精度三维位移台、CCD 相机等三个关键模块的集成控制,其界面如图 2 所示。该软件不仅具备常用的加工功能(如直线加工、圆加工、矩形加工、点加工等),而且具备通过导入 NC 代码实现目标形状定制加工的功能。一般情况下,首先用一系列点坐标 (x, y, z) 存储加工路径的特征节点信息,然后将这些特征节点按照具体加工需求用直线、圆弧等按顺序连接,辅以电控快门的同步通断,即可实现飞秒激光沿预设路径进行加工。



图 2 飞秒激光加工系统控制软件界面

Fig. 2 Software interface of femtosecond laser processing system

2.2 样品局部表面高度的判断方法

飞秒激光加工试验开始前,往往需要确定样品表面高度,将其作为每次加工的参考位置。具体方法为:调节位移台 Z 轴位移量并使用 10×物镜 (NA=0.25) 观察样品表面,假设 Z 轴坐标为 z_{image} 时成像清晰,且 Z 轴坐标为 $z_{\text{image}} \pm 5 \mu\text{m}$ 时模糊程度一致,则认为 Z 轴坐标为 z_{image} 时样品局部高度与像平面重合。该物镜的像平面与焦平面偏差为 Δz_{focal} ,因此 Z 轴坐标 $z = z_{\text{image}} + \Delta z_{\text{focal}}$ 时样品局部高度与焦平面重合,记为 z_{surf} 。由于焦深的存在,前述判断成像清晰的方法存在一定误差,通过以下试验进行分析。以 $1 \mu\text{m}$ 为步长从 $z_{\text{image}} - 20 \mu\text{m}$ 到 $z_{\text{image}} + 20 \mu\text{m}$ 的范围内移动 Z 轴,在相同条件下拍摄对应的 41 张照片,分别通过灰度涨落变化函数、梯度向量平方函数、拉普拉斯梯度函数、二级梯度平方函数评估对焦效果,如图 3 所示。四种函数的评估结果均具有单峰性,最大值处即为通过该函数判断的成像清晰位置:灰度涨落变化函数评估结果在 $z_{\text{image}} - 2 \mu\text{m}$ 时达到

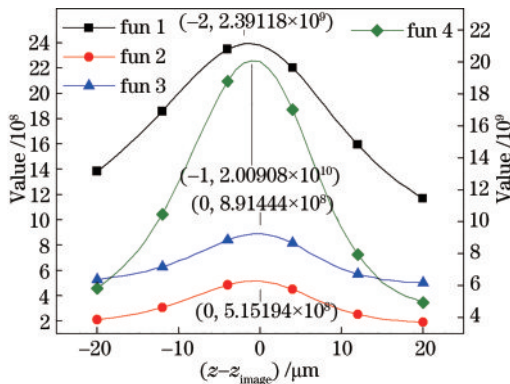


图 3 对焦评估函数结果 (fun 1~fun 4 分别对应灰度涨落变化函数、梯度向量平方函数、拉普拉斯梯度函数、二级梯度平方函数)

Fig. 3 Results of the focus evaluation functions (fun 1~fun 4 correspond to gray-level fluctuation function, gradient square function, Laplace gradient function, and quadratic gradient squared function)

最大值;梯度向量平方函数、拉普拉斯梯度函数评估结果在 z_{image} 时达到最大值;二级梯度平方函数评估结果在 $z_{\text{image}} - 1 \mu\text{m}$ 时达到最大值。前述四种对焦评估函数之间的偏差在 $2 \mu\text{m}$ 以内,与前文确定 z_{image} 方法的偏差亦在 $2 \mu\text{m}$ 以内。

2.3 基于分区平面拟合的校正方法

分区平面拟合的校正方法,是一种用拟合平面近似描述样品表面,并以此为依据校正加工路径的 Z 坐标,实现飞秒激光沿样品表面起伏进行加工的方法。该方法在 X-Y 平面内将样品待加工区域划分为一个或若干个区域,每个区域分别用一个平面来近似描述样品表面,通过计算调整加工路径点的 Z 坐标,使加工路径始终位于这些平面内(或沿 Z 轴方向偏置固定距离进行离焦加工),如图 4 所示。当这些平面与样品实际表面的 Z 坐标偏移小于特定值时,加工效果不受影响。

分区平面拟合校正方法的基本流程如下:

- 1) 调节三维位移平台 X 轴和 Y 轴,将样品表面加工起点移动到 CCD 视场中心,使用 2.2 节的方法获得此处的 z_{surf} 。
- 2) 原始加工路径为二维平面内的一系列点 $M_i(x_i, y_i, z)$ ($1 \leq i \leq L, z \equiv z_M$),若是利用焦点加工,则 $z_M = z_{\text{surf}}$,若是离焦加工,则 $z_M \neq z_{\text{surf}}$ 。
- 3) 在 X-Y 平面内构造一个矩形区域 ($x_a \leq x \leq x_b, y_a \leq y \leq y_b$),使加工路径 M_i 的所有 x_i, y_i 满足 $x_a \leq x_i \leq x_b$ 且 $y_a \leq y_i \leq y_b$ 。
- 4) 选取前述矩形区域中心及边缘的 5 个点 P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 ,如图 5(a) 所示,分别使用 2.2 节的方法获得 z_{surf} ,依次记为 $z_0, z_{-\Delta x}, z_{+\Delta x}, z_{-\Delta y}, z_{+\Delta y}$ 。
- 5) 计算拟合平面方程 $z = f(x, y) = D_x x + D_y y + L_0$,其中

$$D_x = \frac{z_{+\Delta x} - z_{-\Delta x}}{2\Delta x}, \quad (1)$$

$$D_y = \frac{z_{+\Delta y} - z_{-\Delta y}}{2\Delta y}, \quad (2)$$

$$L_0 = \frac{4z_0 + z_{+\Delta x} + z_{-\Delta x} + z_{+\Delta y} + z_{-\Delta y}}{8} - D_x x_c - D_y y_c. \quad (3)$$

- 6) 如图 5(b) 所示,计算点 P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 处样品表面与拟合平面在 Z 方向的误差 Δz 分别为

$$\Delta z_0 = z_0 - f(x_c, y_c) = \frac{4z_0 - z_{+\Delta x} - z_{-\Delta x} - z_{+\Delta y} - z_{-\Delta y}}{8}, \quad (4)$$

$$\Delta z_1 = z_{-\Delta x} - f(x_c - \Delta x, y_c) = \frac{3z_{+\Delta x} + 3z_{-\Delta x} - 4z_0 - z_{+\Delta y} - z_{-\Delta y}}{8}, \quad (5)$$

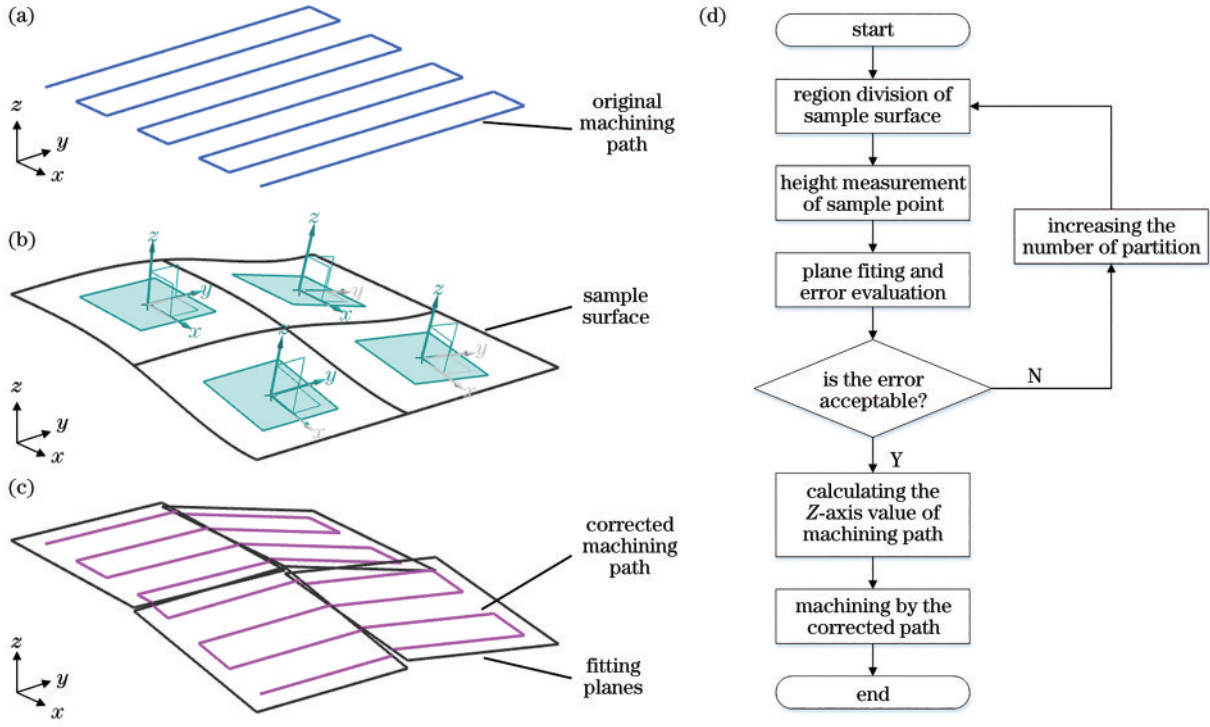


图 4 分区平面拟合校正方法示意图。(a) 原始加工路径；(b) 样品表面；(c) 校正后的加工路径；(d) 方法流程图
 Fig. 4 Schematic of correction by sub-regional plane fitting. (a) Original machining path; (b) sample surface; (c) corrected machining path; (d) flow chart of proposed method

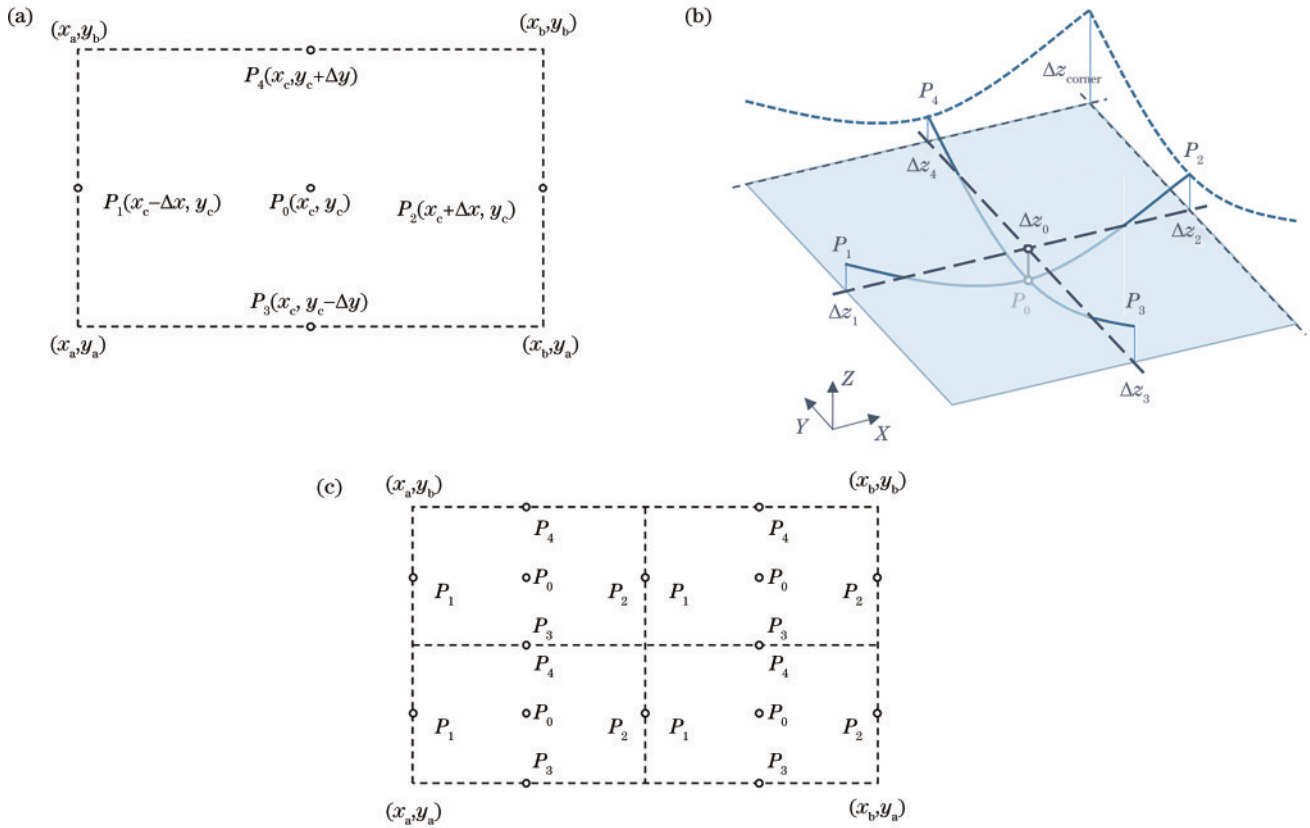


图 5 区域划分及采样点选取示意图。(a) 划分为 1 个矩形区域；(b) 误差计算示意图；(c) 划分为 2×2 个矩形区域
 Fig. 5 Schematic of sub-region division and sample points selection. (a) Divide into one rectangle region; (b) schematic of error calculation; (c) divide into rectangle regions by 2×2

$$\Delta z_2 = z_{+\Delta x} - f(x_c + \Delta x, y_c) = \frac{3z_{+\Delta x} + 3z_{-\Delta x} - 4z_0 - z_{+\Delta y} - z_{-\Delta y}}{8} = \Delta z_1, \quad (6)$$

$$\Delta z_3 = z_{-\Delta y} - f(x_c, y_c - \Delta y) = \frac{3z_{+\Delta y} + 3z_{-\Delta y} - 4z_0 - z_{+\Delta x} - z_{-\Delta x}}{8}, \quad (7)$$

$$\Delta z_4 = z_{+\Delta y} - f(x_c, y_c + \Delta y) = \frac{3z_{+\Delta y} + 3z_{-\Delta y} - 4z_0 - z_{+\Delta x} - z_{-\Delta x}}{8} = \Delta z_3. \quad (8)$$

进一步估算矩形区域端点位置的误差为

$$\Delta z_{\text{corner}} = \Delta z_1 + \Delta z_3 - \Delta z_0 = \frac{3z_{+\Delta x} + 3z_{-\Delta x} + 3z_{+\Delta y} + 3z_{-\Delta y} - 12z_0}{8}. \quad (9)$$

7) 试验不同离焦距离下的加工效果,将不影响加工效果的最大离焦距离的绝对值记为 Δz_{max} ,若 $|\Delta z_0|$ 、 $|\Delta z_1|$ 、 $|\Delta z_3|$ 、 $|\Delta z_{\text{corner}}|$ 均小于 Δz_{max} ,则认为该拟合平面的误差不影响加工效果,进行下一步。否则将第 3 步构

造的矩形区域进一步细分为 $m \times n$ 个矩形区域 [图 5(c)],对细分得到的每一个子区域重复步骤 4 及其后续步骤。

8) 使用拟合方程重新计算加工路径点 $M_i(x_i, y_i, z)$ 的 Z 坐标 $z_i = f(x_i, y_i) + z_M - z_{\text{surf}}$,若步骤 3 已划分多个子区域,则根据点 $M_i(x_i, y_i, z)$ 所属子区域使用该区域的拟合方程,得到校正后的加工路径点 $M'_i(x_i, y_i, z_i)$ ($1 \leq i \leq L$),最后进行加工。

2.4 基于二维插值的校正方法

基于二维插值的校正方法,是一种根据样品表面一定数量的采样点,通过二维插值算法获得加工路径点的 Z 坐标并进行校正,实现飞秒激光沿样品表面起伏进行加工的方法。该方法首先按一定的 X - Y 取样间隔测量样品表面的 Z 轴坐标,然后通过二维插值运算得到目标点的 Z 轴坐标,如图 6 所示。在取样点足够多的情况下,插值运算得到的 Z 轴坐标与样品实际表面的 Z 轴坐标误差较小,加工效果不受影响。

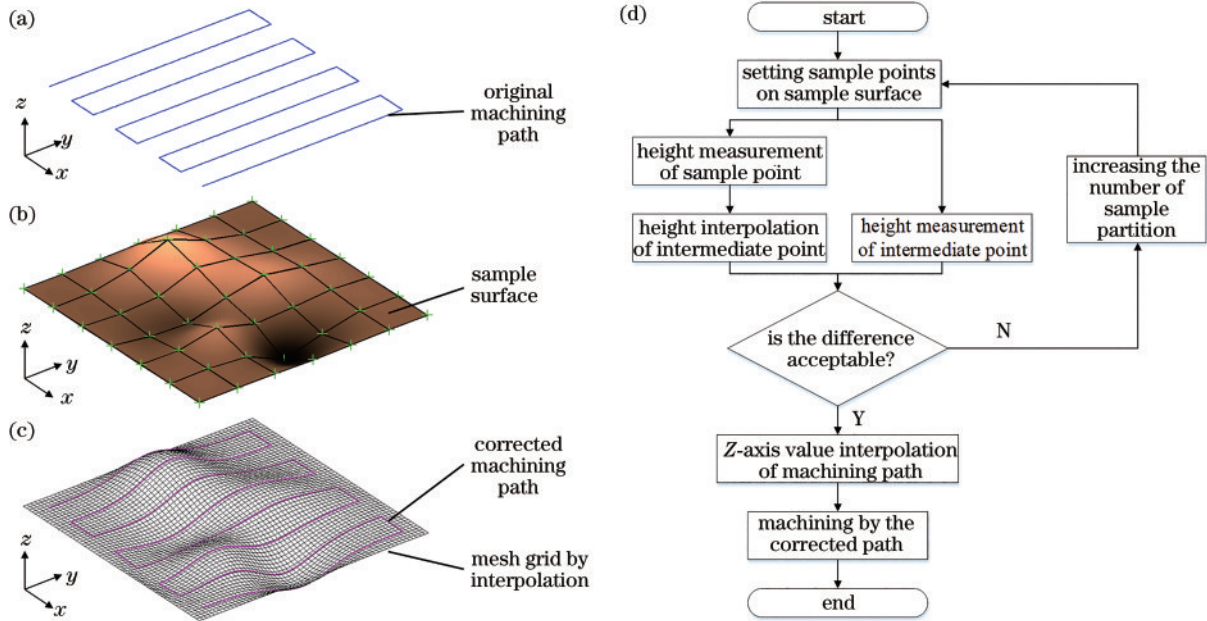


图 6 基于二维插值的校正方法示意图。(a) 原始加工路径;(b) 样品表面;(c) 校正后的加工路径;(d) 方法流程图

Fig. 6 Schematic of correction by two-dimensional interpolation. (a) Original machining path; (b) sample surface; (c) corrected machining path; (d) flow chart of proposed method

二维插值校正方法的基本流程如下:

- 1) 原始加工路径为二维平面内的一系列点 $M_i(x_i, y_i, z)$ ($1 \leq i \leq L, z = z_M$),在 X - Y 平面内构造一个矩形区域 ($x_a \leq x \leq x_b, y_a \leq y \leq y_b$),使加工路径 M_i 的所有 x_i, y_i 满足 $x_a \leq x_i \leq x_b$ 且 $y_a \leq y_i \leq y_b$ 。
- 2) 将矩形区域分别在 X 、 Y 方向按等间距划分,划分的 X 、 Y 坐标分别记为 x_1, x_2, \dots, x_m 和 y_1, y_2, \dots, y_n 。
- 3) 根据 2.2 节获得 z_{surf} 的方法,得到样品表面 (x_i, y_j) ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$) 共 $m \times n$ 个点的 Z 坐标

z_{ij} , 将其计入矩阵 Z_1 , 表示为

$$Z_1 = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{21} & \cdots & z_{m1} \\ z_{12} & z_{22} & \cdots & z_{m2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{1n} & z_{2n} & \cdots & z_{mn} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

将相应的 (x_i, y_j) 坐标计入矩阵 X_1 和 Y_1 , 表示为

$$X_1 = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_m \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_m \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$Y_1 = \begin{pmatrix} y_1 & y_1 & \cdots & y_1 \\ y_2 & y_2 & \cdots & y_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_n & y_n & \cdots & y_n \end{pmatrix} \quad (12)$$

4) 抽取部分中间点 $P_{ij}(\frac{x_i+x_{i+1}}{2}, \frac{y_j+y_{j+1}}{2})$

($1 \leq i \leq m-1, 1 \leq j \leq n-1$), 测量样品表面中间点位置的 Z 轴实际坐标 z_{ij}^{surf} 。将矩阵 X_1, Y_1, Z_1 以及中间点 $P_{ij}(x, y)$ 的 XY 坐标导入软件中, 执行二维插值命令 $z = \text{interp2}(X1, Y1, Z1, x, y, 'spline')$, 计算在 X_1, Y_1, Z_1 描述的曲面上中间点 $P_{ij}(x, y)$ 位置的二维三次样条插值 Z 坐标, 记为 z_{ij}^{interp} 。计算实际 Z 坐标与插值 Z 坐标的误差 $\Delta z_{ij} = |z_{ij}^{surf} - z_{ij}^{interp}|$ 。试验不同离焦距离下的加工效果, 将不影响加工效果的最大离焦距离的绝对值记为 Δz_{max} , 若 Δz_{ij} 最大值小于 Δz_{max} , 则进行下一步, 否则回到步骤 2, 增加划分次数 m, n 并重复上述步骤。

5) 将加工路径点 $M_i(x_i, y_i, z)$ ($1 \leq i \leq L, z = z_M$) 的 X、Y 坐标分别计入向量 X_2 和 Y_2 , 表示为

$$X_2 = (x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_L), \quad (13)$$

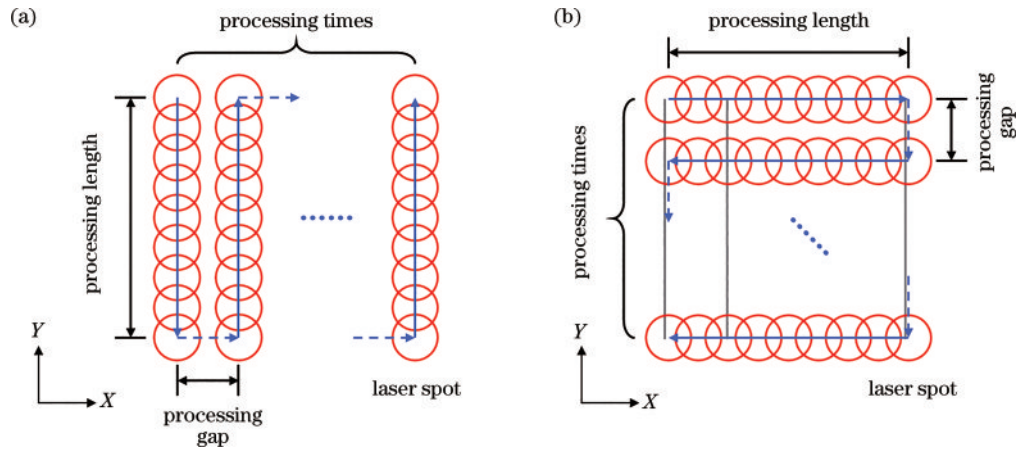


图 7 飞秒激光加工路径示意图。(a) Y 方向单向加工; (b) XY 方向双向加工

Fig. 7 Schematic of femtosecond laser processing. (a) Single direction machining in Y direction; (b) double direction machining in XY directions

3.1 基于分区平面拟合校正方法的加工效果验证

激光加工参数如下: 激光功率 $P=100 \text{ mW}$, 加工速率 $u=10 \text{ mm/s}$, 加工间隔 $\Delta d=20 \text{ }\mu\text{m}$, 采用离焦加工模式, 离焦距离 $\Delta f = z_M - z_{surf} = -40 \text{ }\mu\text{m}$, 即样品表面低于焦平面 $40 \text{ }\mu\text{m}$, 样品表面尺寸 $S=22 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$, 加工路径如图 7(a) 所示。在前述参数下进行不同 Z 轴距离的加工试验得到表面微结构, 通过光学显微镜观察微结构分布是否由连续变为不连续, 由此判断 Z 轴距离偏差大于 $30 \text{ }\mu\text{m}$ 会影响加工效果。样品 1 未进行校正即开展加工, 样品 2 利用分区平面拟合校正方法进行校正后开展加工。

表 1 是样品 2 的平面拟合数据。序号 1 为第一次

$$Y_2 = (y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_L) \quad (14)$$

6) 将上述向量导入软件中, 执行二维插值命令 $Z2 = \text{interp2}(X1, Y1, Z1, X2, Y2, 'spline')$, 计算在 X_1, Y_1, Z_1 描述的曲面上, 与加工路径点 $M_i(x_i, y_i, z)$ 的 XY 坐标对应位置的二维三次样条插值 Z 轴坐标 Z_2 , 表示为

$$Z_2 = (z_1 \ z_2 \ \cdots \ z_L) \quad (15)$$

7) 若是利用焦点加工, 使用路径点 $M'_i(x_i, y_i, z_i)$ ($1 \leq i \leq L$) 替换原有加工路径; 若是离焦加工, 离焦量为 Δz , 则使用路径点 $M''_i(x_i, y_i, z_i + \Delta z)$ ($1 \leq i \leq L$) 替换原有加工路径。

3 试验结果及分析

选择表面起伏约 $\pm 100 \text{ }\mu\text{m}$ 的金属铜材料, 利用飞秒激光加工控制软件具备的直线阵列加工功能, 分别开展基于前述两种校正方法的飞秒激光加工表面微结构试验, 对比分析校正前后的加工效果, 加工路径示意图如图 7 所示。其中: 图 7(a) 所示加工路径为 Y 方向单向加工, 主要用于分区平面拟合校正方法的加工验证; 图 7(b) 所示加工路径为 XY 方向双向加工, 主要用于二维插值校正方法的加工验证。

平面拟合数据, 拟合平面与样品表面 Z 坐标偏差的绝对值最大为 $66.4 \text{ }\mu\text{m}$ (大于 $30 \text{ }\mu\text{m}$), 会对加工效果造成影响。因此, 重新将样品表面划分为四个区域分别进行拟合, 拟合平面及采样点如图 8 所示, 拟合结果对应表 1 中序号 2~5 的数据, 拟合平面与样品表面 Z 坐标偏差的绝对值最大为 $9.8 \text{ }\mu\text{m}$ (小于 $30 \text{ }\mu\text{m}$), 满足不影响加工效果的基本需求。因此, 按第二次拟合结果对加工路径进行校正并进行加工。

图 9 是飞秒激光加工的试验结果。其中, 图 9(a) 是样品 1 和样品 2 的宏观照片。在相同拍摄条件下, 样品 1 表面加工区域不同位置对可见光的反射呈现差异, 样品 2 表面加工区域不同位置对可见光的反射未

表 1 试验样品 2 的平面拟合数据
Table 1 Plane fitting data of experiment sample 2

Item	Fitting parameter			Fitting error / μm			
	D_x	D_y	L_0	Δz_0	Δz_1	Δz_3	Δz_{corner}
1	0.002682	0.005182	-85.2285	22.1	-50.4	6.1	-66.4
2	0.008909	0.003364	-107.1890	2.9	-9.1	3.4	-8.6
3	-0.004180	0.003364	70.8512	2.6	-7.4	2.1	-7.9
4	0.008364	0.005182	-130.7630	3.1	-9.9	3.6	-9.4
5	-0.003090	0.006364	8.8496	3.2	-3.8	-2.8	-9.8

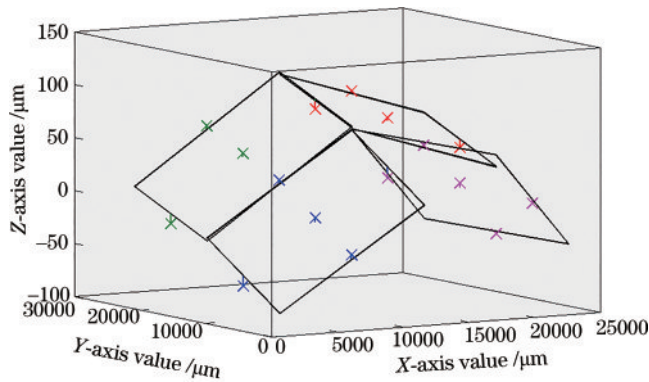


图 8 样品 2 表面采样点及分区平面拟合结果

Fig. 8 Surface sampling point of sample 2 and results of plane fitting in each sub-region

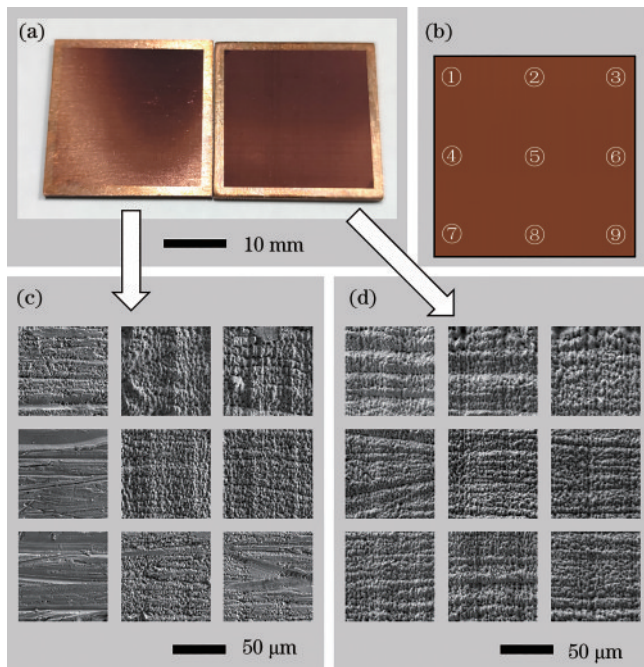


图 9 表面微结构加工结果。(a) 加工后的试验样品照片；(b) SEM 表征区域示意图；(c) 样品 1 的 SEM 图像；(d) 样品 2 的 SEM 图像

Fig. 9 Surface microstructure machining results. (a) Photograph of experimental sample after machining; (b) schematic of characterization locations by SEM; (c) SEM image of sample 1; (d) SEM image of sample 2

出现差异,这表明样品 2 的表面微结构均匀性和一致性优于样品 1。为确认前述判断,利用扫描电子显微镜(SEM)对样品 1 和样品 2 按图 9(b)所示的 9 个区域进行微观形貌表征,结果分别如图 9(c)和图 9(d)所示。对于样品 1,由于未进行平面校正即开展飞秒激光加工试验,激光焦点与样品表面的 Z 轴偏差不可控,不同区域的微结构形貌均匀性和一致性较差,具体表现为:区域④和⑦离焦量最大,样品表面接收的激光能量密度小于材料损伤阈值,无法实现微结构加工;区域①、⑧、⑨离焦量较大,样品表面可加工出微结构,但其局部均匀性和一致性较差;区域②、③、⑤、⑥离焦量接近,微结构均匀性和一致性相对较好。对于样品 2,由于采用分区平面拟合校正方法,实现了加工路径 Z 坐标调整,飞秒激光加工过程中激光焦点与样品表面的 Z 轴偏差始终控制在不影响加工效果的范围内,故不同区域的微结构形貌均匀性和一致性相对较好。

3.2 基于二维插值校正方法的加工效果验证

激光加工参数如下:激光功率 $P=500\text{ mW}$,加工速率 $u=10\text{ mm/s}$,加工间隔 $\Delta d=10\text{ }\mu\text{m}$,采用焦点加工模式,样品表面尺寸 $S=22\text{ mm}\times 22\text{ mm}$,加工路径如图 7(b)所示。在前述参数下进行不同 Z 轴距离的 Y 方向划线试验,通过光学显微镜观察加工沟槽宽度是否发生明显变化,如图 10 所示。根据沟槽宽度测量结果,得出 Z 轴距离偏差大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 会影响加工效果。样品 3 未进行校正即开展加工,样品 4 利用二维插值校正方法进行校正后开展加工。

图 11 是样品 4 表面采样点及插值计算得到的中间点示意图,选取 5×5 的采样点测量样品表面 Z 坐标,通过插值方法计算了与之对应的 16 个中间点的 Z 坐标。表 2 是与图 11 对应的二维插值拟合数据。测量中间点 XY 坐标位置的实际样品表面 Z 坐标,计算其与插值坐标的偏差 Δz 。经计算, Δz 的绝对值最大为 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ (小于 $10\text{ }\mu\text{m}$),不会对加工效果造成影响。因此,使用前述采样点数据对加工路径点进行插值运算,获得每个点的插值 Z 轴坐标,替换原有路径 Z 坐标后进行加工。

图 12 是飞秒激光加工试验结果。其中,图 12(a)是样品 3 和样品 4 的宏观照片。在相同拍摄条件下,样

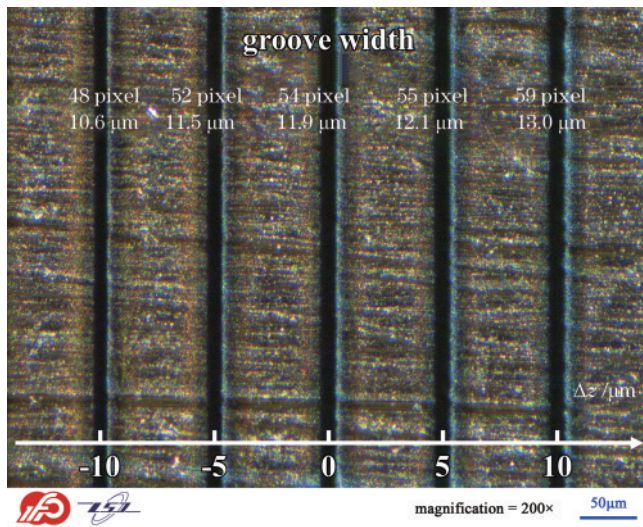


图 10 不同 Z 轴距离的加工沟槽宽度 ($\Delta z = 0$ 代表焦点处加工)

Fig. 10 Groove width machining at different Z distances ($\Delta z = 0$ represents machining at the focal point)

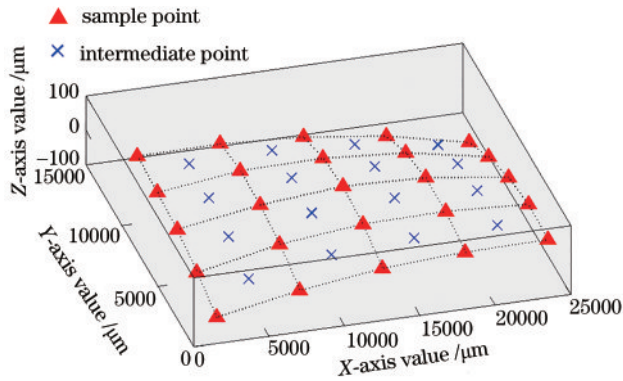


图 11 样品 4 表面采样点及通过插值计算得到的中间点

Fig. 11 Surface sampling point of sample 4 and intermediate points calculated by interpolation

品 3 表面加工区域不同位置对可见光的反射呈现差异, 样品 4 表面加工区域不同位置对可见光的反射未出现差异, 这表明样品 4 的表面微结构均匀性和一致性优于样品 3。为进一步确认前述判断, 利用扫描电子显微镜分别对样品 3 和样品 4 按图 12(b) 所示的 9 个区域进行微观形貌表征, 结果分别如图 12(c) 和

表 2 样品 4 中间点处实际 Z 坐标与插值 Z 坐标的偏差 Δz

Table 2 Difference Δz between real Z-axis value and interpolation Z-axis value of intermediate point of experiment sample 4 unit: μm

Y-axis value of intermediate point	Δz			
	X-axis value of intermediate point			
	4357	9857	15357	20857
3054	1.4	0.8	-2.7	-0.8
8554	-0.8	-0.2	0.7	0.2
14054	-1.4	0.1	1.6	1.2
19554	0.4	-0.7	-1.3	1.1

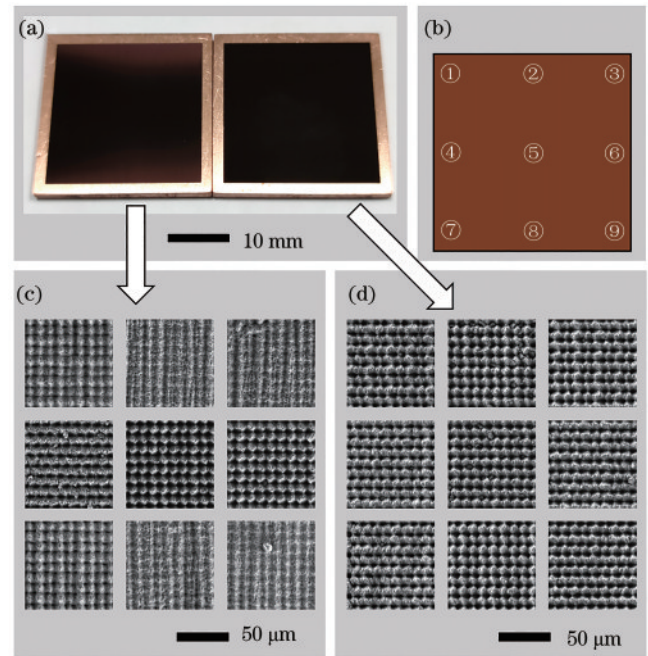


图 12 微凸起结构加工结果。(a) 加工后的试验样品照片; (b) SEM 表征位置示意图; (c) 样品 3 的 SEM 图像; (d) 样品 4 的 SEM 图像

Fig. 12 Result of micro-bulges machining. (a) Photograph of experimental sample after machining; (b) schematic of characterization locations by SEM; (c) SEM image of sample 3; (d) SEM image of sample 4

图 12(d) 所示。对于样品 3, 由于未进行校正即开展飞秒激光加工试验, 加工过程中激光焦点与样品表面的 Z 轴偏差不可控, 不同区域的微结构形貌均匀性和一致性较差, 具体表现为: 区域④ X 方向沟槽更明显, 这是由于激光焦斑在 X、Y 轴方向尺寸不均匀, 离焦量较小时 Y 方向加工深度首先受到影响; 区域①和⑦由于离焦量增大造成激光能量密度降低, 微凸起结构的深度变浅; 区域②、③、⑧、⑨由于离焦量进一步增大, 加工深度进一步变浅; 区域⑤和⑥由于离焦量接近, 微结构均匀性和一致性较为接近。对于样品 4, 由于采用二维插值校正方法, 飞秒激光加工过程中激光焦点与样品表面的 Z 轴偏差始终保持在不影响加工效果的范围内, 因此不同区域的微结构形貌一致性较好。

3.3 校正方法对加工速度的影响分析

对于可实现 XYZ 三轴插补运动的加工位移台而言,若校正只改变原有加工点的 Z 坐标,则加工速度不受影响;若校正时在原有加工点间插入较多的加工点,则在加工速度较高且加工间隔较小的情况下,可能会由于加工位移台及其控制系统的硬件和软件能力不足而影响加工速度。本研究中样品 2 和样品 4,在校正过程中新插入的加工点较少,加工点间隔大于 2000 μm ,设定加工速度为 10 mm/s 时,软件监测到实际速度几乎不受影响。根据加工软件日志,两种校正方法的加工耗时分别为:1)分区平面拟合校正方法,校正前后的加工耗时分别为 40 min 38 s(样品 1)和 40 min 40 s(样品 2);2)二维插值校正方法,校正前后的加工耗时分别为 2 h 42 min 26 s(样品 3)和 2 h 42 min 42 s(样品 4)。因此,本文所述两种校正方法,对加工速度影响基本可忽略。

4 结 论

本文提出的分区平面拟合和二维插值的两种校正方法,通过少量采样点即可近似描述待加工表面的起伏形貌,并以此为依据校正加工路径的高度坐标,使误差控制在不影响加工效果的范围内,都能有效解决飞秒激光加工过程中由于材料表面不平整而导致的激光焦点与材料表面相对距离变化的实际问题,进而保证飞秒激光加工微结构的均匀性。需要指出的是:基于分区平面拟合的校正方法,更适合处理形貌起伏简单(如倾斜平面)的样品,仅用一个区域或几个区域的少量采样点即可较准确地拟合样品表面形貌;基于二维插值的校正方法,更适合处理形貌起伏较复杂的样品,采样点越多则插值结果越接近真实材料表面。同时,由于本文仅是利用显微物镜镜头和 CCD 相机组成的同轴在线监测系统测量样品表面特征点的高度,特征点成像清晰度的判断依赖于人眼,其测量精度和效率有待提升。在现有飞秒激光加工平台上集成高精度测距模块,如激光位移传感器、激光共聚焦传感器等,预期可进一步改善前述问题。

参 考 文 献

- [1] 王华丰,孙轲,孙盛芝,等.飞秒激光诱导金刚石微纳结构及其应用(特邀)[J].红外与激光工程,2020,49(12):20201057.
Wang H F, Sun K, Sun S Z, et al. Femtosecond laser induced microstructures in diamond and applications (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(12): 20201057.
- [2] Tan H, Zhang Y X, Liu Y X, et al. Two-layer vertical welding of glasses by femtosecond laser through galvo scanner[J]. Journal of Optics, 2020, 49(3): 408-415.
- [3] 蔡怀鹏,高健,李博原,等.相对论圆偏振激光与固体靶作用产生高次谐波[J].物理学报,2018,67(21):

214205.

Cai H P, Gao J, Li B Y, et al. High order harmonics generation by relativistically circularly polarized laser-solid interaction[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(21): 214205.

- [4] Davis K M, Miura K, Sugimoto N, et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. Optics Letters, 1996, 21(21): 1729-1731.
- [5] Deng Z F, Chen F, Qing Y, et al. Dragonfly-eye-inspired artificial compound eyes with sophisticated imaging[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(12): 1995-2001.
- [6] Liu X Q, Yu L, Yang S N, et al. Optical nanofabrication of concave microlens arrays[J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(5): 1800272.
- [7] 吴梦楠,李晓炜,向志昆,等.飞秒激光时空整形电子动态调控加工微光学元件[J].中国激光,2022,49(10): 1002501.
Wu M N, Li X W, Xiang Z K, et al. Machining of micro-optical elements using electrons dynamics controlled temporally/spatially shaped femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002501.
- [8] 李江,高筱钧,付作立,等.超快激光仿生复眼加工研究进展[J].中国激光,2022,49(10): 1002704.
Li J, Gao X J, Fu Z L, et al. Research advancement on fabrication of artificial compound eye using ultrafast laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002704.
- [9] 樊华,曹小文,李臻贇,等.飞秒脉冲激光空间光场调控的微透镜阵列制备技术进展[J].液晶与显示,2021,36(6): 827-840.
Fan H, Cao X W, Li Z Z, et al. Progress in femtosecond laser fabrication of microlens array with spatial light modulators[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(6): 827-840.
- [10] Yong J L, Chen F, Yang Q, et al. Superoleophobic surfaces[J]. Chemical Society Reviews, 2017, 46(14): 4168-4217.
- [11] 白雪,陈烽.飞秒激光制备超疏水表面的研究进展[J].光学学报,2021,41(1): 0114003.
Bai X, Chen F. Recent advances in femtosecond laser-induced superhydrophobic surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114003.
- [12] 潘瑞,钟敏霖.超快激光制备超疏水超亲水表面及超疏水表面机械耐久性[J].科学通报,2019,64(12): 1268-1289.
Pan R, Zhong M L. Fabrication of superwetting surfaces by ultrafast lasers and mechanical durability of superhydrophobic surfaces[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(12): 1268-1289.
- [13] 石惠,林御寒,贾天卿,等.基于空间光调制器的飞秒激光时空干涉在不锈钢表面高效率制备超疏水功能的仿生结构[J].光子学报,2021,50(6): 0650110.
Shi H, Lin Y H, Jia T Q, et al. Efficient processing of super-hydrophobic biomimetic structures on stainless steel surfaces by spatiotemporal interference of two femtosecond laser beams based on spatial light modulator [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6): 0650110.
- [14] Polikarpov M, Snigireva I, Morse J, et al. Large-

- acceptance diamond planar refractive lenses manufactured by laser cutting[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2015, 22(1): 23-28.
- [15] Terentyev S, Blank V, Polyakov S, et al. Parabolic single-crystal diamond lenses for coherent X-ray imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(11): 111108.
- [16] Kononenko T V, Ralchenko V G, Ashkinazi E E, et al. Fabrication of polycrystalline diamond refractive X-ray lens by femtosecond laser processing[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(3): 152.
- [17] Terentyev S, Polikarpov M, Snigireva I, et al. Linear parabolic single-crystal diamond refractive lenses for synchrotron X-ray sources[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2017, 24(1): 103-109.
- [18] Tang H, di Franco C, Shi Z Y, et al. Experimental quantum fast hitting on hexagonal graphs[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(12): 754-758.
- [19] Wang C Y, Gao J, Jin X M. On-chip rotated polarization directional coupler fabricated by femtosecond laser direct writing[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 102-105.
- [20] Xu X Y, Huang X L, Li Z M, et al. A scalable photonic computer solving the subset sum problem[J]. *Science Advances*, 2020, 6(5): eaay5853.
- [21] Wang Y, Lu Y H, Gao J, et al. Experimental demonstration of a quantum anomaly induced by borders [J]. *Physical Review A*, 2021, 104(2): 022419.
- [22] Pan A, Gao B, Chen T, et al. Fabrication of concave spherical microlenses on silicon by femtosecond laser irradiation and mixed acid etching[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15245-15250.
- [23] Li R, Nie W J, Lu Q M, et al. Femtosecond-laser-written superficial cladding waveguides in Nd: CaF₂ crystal[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 92: 163-167.
- [24] 杨雪, 孙会来, 岳端木, 等. 飞秒激光制备微透镜阵列的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0500005. Yang X, Sun H L, Yue D M, et al. Research progress of femtosecond laser fabrication of microlens array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500005.