

文章编号:1001-5078(2024)10-1554-08

· 激光应用技术 ·

超短激光微加工数学建模优化分析

施培成, 张 钦

(郑州工业应用技术学院, 河南 郑州 451150)

摘要:超短激光微加工进行优化时涉及到多个参数,而这些参数间往往存在着复杂的相互关系,导致优化方法的优化性能较差。为此,提出超短激光微加工数学建模优化分析方法。首先,基于导热微分方程分析超短激光微加工在表面产生的热累积作用,根据分析结果构建超短激光微加工的数学模型;然后,通过数学模型,分析不同抛光参数对加工过程中的热效应和热应力的影响程度;最后,采用递阶结构对硬化层的分布平均性、表面层深与硬度等目标进行优化,以此构建超短激光微加工数学优化模型,实现优化分析。实验结果表明:运用该模型后平均加工精度高达99%,粗糙度最低时仅为5%,光洁度与均匀性均达到了90%以上,具有较好的实用性。

关键词:超短激光微加工;导热微分方程;数学建模优化;表面粗糙度;加工精度

中图分类号:TN249;TG665 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.008

Optimization analysis of mathematical modeling for ultra short laser microfabrication

SHI Pei-cheng, ZHANG Qin

(Zhengzhou University of Industrial Technology, Zhengzhou 451150, China)

Abstract: Ultrashort laser micromachining for optimization involves a number of parameters, and there are often complex relationships between these parameters, resulting in poor optimization performance of the optimization method. For this reason, a mathematical modeling and optimization analysis method for ultrashort laser micromachining is proposed. First of all, the thermal accumulation effect of ultrashort laser micromachining on the surface is analyzed based on the differential equation of heat conduction, and the mathematical model of ultrashort laser micromachining is constructed according to the analysis results. Then, through the mathematical model, the influence of different polishing parameters on the thermal effect and thermal stress in the processing process is analyzed. Finally, the hierarchical structure is adopted to optimize the distribution uniformity, surface layer depth and hardness of the hardened layer, so as to build the mathematical optimization model of ultrashort laser micromachining and achieve the optimization analysis. The experimental results show that the average machining accuracy is as high as 99%, the lowest roughness is only 5%, and the finish and uniformity are more than 90%, which is of good practicability.

Keywords: ultra short laser micro processing; differential equation of heat conduction; mathematical modeling optimization; surface roughness; processing accuracy

1 引言

超短激光微加工技术是一种高精度、高效率的

前沿加工技术,它已经在多个领域得到广泛应用。

该技术利用纳秒或飞秒级别的超短激光脉冲,通过

基金项目:2021年河南省科技攻关计划项目(No. 212102210372)资助。

作者简介:施培成(1977-),女,本科,讲师,研究方向为数学教育教学、数学应用。E-mail:lh5454@yeah.net

收稿日期:2024-01-15

控制激光的能量和空间分布,实现对材料进行微细加工,包括切割、打孔、雕刻等^[1-2]。然而,虽然超短激光微加工技术具有高加工精度,但在进行抛光加工时,目前面临着一些限制。传统超短激光微加工的优化方法精度有限,往往无法满足小面积高精度抛光的需求。这可能导致加工表面不够平坦、出现划痕、边缘效应以及表面残留等问题。因此,需要对超短激光微加工进行有效优化。

李文毅^[3]等人采用激光-铣削组合加工的工艺方法对 AFRP 进行试验研究,优化 AFRP 激光-铣削组合加工工艺参数。激光-铣削组合加工的切削温度更低,切削力以及毛刺因子更小,但是该方法没有分析激光加工产生的热累积作用,不能给抛光工艺参数的进一步优化带来实际根据,具有加工精度低的缺陷。唐文翰^[4]等人研究了工艺参数对切割质量指标的影响规律和切割质量对工艺参数的敏感性,并以热影响区、锥度、有效切割速度为目标进行了优化。但是该方法没有分析热累积作用对各项抛光参数产生的影响,在优化过程中所用的时间较长,存在加工时间长的问题。Qu S 等人研究基于超声雾化的超声振动抛光参数优化^[5],采用超声雾化辅助抛光溶剂是一种有效的方法,可以提高抛光过程中的效果。此方法利用超声波的振动作用,将液体溶剂通过雾化技术转化为微小的雾状颗粒,并与工件表面接触,从而实现更均匀和细致的抛光作用。该方法涉及到多个参数。而这些参数之间往往存在复杂的相互关系。导致优化结果受限。Imed Ben Marzoug 等人采用全因子实验设计来评估生物抛光工艺优化中考虑的因素的影响。在优化中,观察和预测的撕裂强度与抗拉强度损失之间的相关性很大,模型的相关系数和 F 比的重要值证明了模型的有效性^[6]。但是该方法不能有效地针对不同的工件和材料提供一致且准确的优化结果。

为了解决上述方法存在的问题,提出超短激光微加工数学建模优化分析方法。实验结果表明:优化方法使的模型评价精度高达 93.158%。加工精度最高达 99%。且优化后的粗糙度始终在 10% 以下,最低时仅为 5%。说明本文超短激光微加工数学建模优化方法的性能较好,这是由于本文采用递阶结构对硬化层的分布平均性、表面层深与硬度等

目标进行优化,递阶结构优化方法通过逐层解决子问题,逐步逼近整体最优解。这种逐步逼近的方法可以使优化过程更加稳健、可靠。由于每一步优化都基于前一步的结果,因此可以避免陷入局部最优解或陷入细粒度优化的困境。

2 基于导热微分方程的激光微加工热累积作用分析

热累积作用是指在超短激光微加工过程中,由于激光的高能量密度和快速脉冲时间,会导致材料表面受到高温的影响,产生热效应和热应力,从而影响材料的物理和化学性质。这些热效应和热应力会通过导热作用向材料内部传递,从而导致材料内部温度分布发生变化。因此,可以利用导热微分方程来描述材料内部温度分布随时间和空间的变化规律。通过导热微分方程对超短激光微加工优化建立数学模型,可以帮助我们更好地理解热效应和热应力对超短激光微加工抛光效果的影响规律,进而优化抛光参数,实现超短激光微加工优化,进而提高加工效率和产品质量。当超短激光脉冲作用到材料表面时会产生能量 E_p , 能量 E_p 通常分为两个部分,不是完全被材料所吸收,材料会反射掉一部分能量,用 η_{abs} 描述激光材料对应的吸收系数,用 $\eta_{\text{abs}} \cdot E_p$ 描述材料产生作用时的能量^[7]。

作用在材料上的能量通常可以分为三个部分,第一部分为在材料内部残余的能量 E_{res} ;第二部分为蒸汽带走的能量 E_v ;第三部分为材料消融的能量 E_{abl} ,则可以得到以下表达式:

$$\eta_{\text{abs}} \cdot E_p = E_{\text{res}} + E_v + E_{\text{abl}} \quad (1)$$

超短激光射到材料表面后,残余能量 E_{res} 会提高材料的表面温度,温度直到下个超短激光脉冲的到来后会不断降低,因此,可以通过两个阶段描述残余能量的作用过程,分别是材料热扩散的降温过程和材料吸收残余能量的升温过程^[8-10]。

当入射超短激光能量分布满足高斯分布且作用于材料表面时,材料中的能量会沉积增加,激光脉冲中心点坐标 (x_n, y_n) 与材料表面上的能量密度 Ω 分布之间存在的关系可通过下式进行描述:

$$\Omega = \frac{2AE_p}{\pi\omega_0^2} e^{-\frac{2[(x-x_n)^2+(y-y_n)^2]}{\omega_0^2}} \times \delta(z) (\eta_{\text{abs}} E_p) \quad (2)$$

式中, A 为入射能量在消融后材料表面的吸收系数; x_n, y_n 为激光脉冲中心对应的坐标; x 为每个点在材

料表面中横坐标; y 为每个点在材料表面的纵坐标。 $\delta(z)$ 代表的是迪拉克函数。保证材料表面层激光能量单位沉积是迪拉克函数的主要功能,当 z 值为0时能量的沉积才会发生^[11-13]。

由于超短激光的照射,材料表面会产生能量沉积升温,当脉冲消失后,随着时间的推移由于热扩散作用会降低,能够通过热传导方程对热扩散的过程进行描述,一维热传导方程的表达式如下:

$$\rho \times c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \times \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3)$$

扩展上述方程,获得导热微分方程的三维形式,其表达式如下:

$$\rho \times c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \times \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \times \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \times \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

分析上式可知,热扩散系数 k 、比热容 c 和材料密度 ρ 是决定材料降温的主要参数,通过上述公式分析材料表面中超短激光产生的能量。

3 数据建模及超短激光微加工优化分析

3.1 数学建模

基于上述的导热微分方程,可以建立超短激光微加工的数学模型,从而实现加工过程的数值模拟和计算。通过构建的数学模型获得材料表面形成沟壑的原理,分析影响激光材料表面粗糙度的参数,以及激光加工质量受各工艺参数影响的规律,为超短激光微加工的优化分析提供理论基础。

超短激光微加工数学建模优化分析方法通过解析式的方式获得表面粗糙度的计算式^[14]。例如 $f_k(x)$ 表示第 k 次处理后的深度,那么采用分段函数表示每次各行的扫描深度:

$$\begin{cases} f_1(x) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, 0 < x \leq a \\ f_2(x) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, b < x \leq a + b \\ \dots \\ f_k(x) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, kb < x \leq a + kb \\ f_{k+1}(x) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, (k+1)b < x \leq a + (k+1)b \\ \dots \\ f_n(x) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, nb < x \leq a + nb \end{cases} \quad (5)$$

当超短激光作用于材料表面后,通过下式对刻蚀的总深度进行计算:

$$f(x) = f_1(x) + f_2(x) + \dots + f_k(x) + f_{k+1}(x) + \dots + f_n(x) \quad (6)$$

求和各分段函数,获得下式:

$$\begin{cases} c, 0 < x \leq b \\ 2c, b = c, b < x \leq 2b \\ 3c, 2b < x \leq a + 3b \\ \dots \\ kc, (k-1)b < x \leq kb \\ (k+1)c, kb < x \leq a \\ kc, a < x \leq (k+1)b \\ (k+1)c, (k+1)b < x \leq a + b \end{cases} \quad (7)$$

分析上式获得以下结论:

(1) 光斑偏移量增高 b 时,材料经过刻蚀的厚度增加。

(2) 刻蚀实际的沟壑深度是 $(k+1)c$ 、宽度是 $(k+1)b - a$ 的细条,其中与深度是 kc 、宽度是 $a - kb$ 细条反复显示,这一刻,光斑偏移量 b 代表沟壑的起伏频次。

在粗糙度模型中轮廓最小二乘法中线是基础,轮廓中线对应的回归方程表达式如下:

$$\hat{y} = (k+1)c + mx \quad (8)$$

设 Y' 代表的是轮廓中线与轮廓线上任意一点之间的距离,其计算公式如下:

$$Y' = \hat{y} - k - mx_i \quad (9)$$

设粗糙度值 R_a 是轮廓中线与采样点之间绝对值对应的平均值,下式即为超短激光微加工的数学模型:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y'| dx \quad (10)$$

通过上述建立的超短激光微加工的数学模型,我们可以分析不同抛光参数对加工过程中的热效应和热应力的影响程度,进而找到最优的抛光参数组合,以达到最佳的抛光效果。

3.2 超短激光微加工数学优化模型的构建

根据上述的超短激光微加工的数学模型,进行超短激光微加工优化。激光抛光的扫描路径是“之”字形,具体路径及抛光作用原理如图1所示。

根据上述激光抛光原理分析,对超短激光微加工进行优化。优化的目标是通过调整抛光参数,使得加工表面的质量达到最佳化。并采用递阶结构将硬化层的分布平均性、表面层深与硬度等目标进行优化,递阶结构优化方法通过逐层解决子问题,逐步逼近整体最优解。这种逐步逼近的方法可以使优化过程更加稳健、可靠。由于每一步优化都基于前一步的结果,因此可以避免陷入局部最优解或陷入细粒度优化的困境。

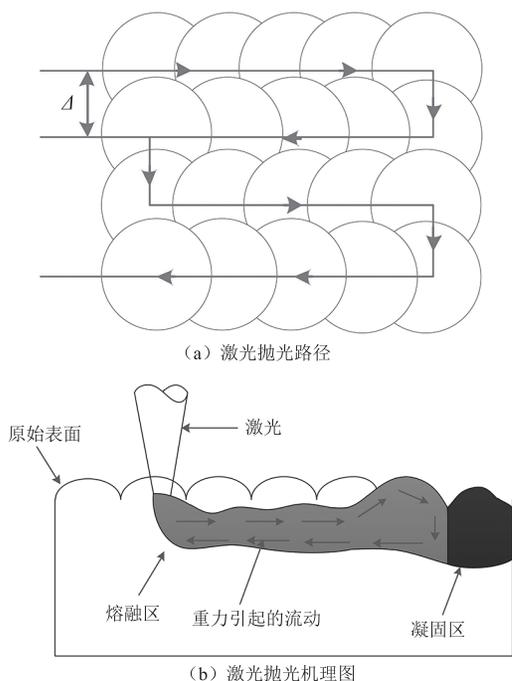


图1 激光抛光原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser polishing principle

超短激光微加工优化的主要目的是通过工艺参数优化提高硬化层的质量,方向是硬化层几何形貌、组织形态和机械功能的三个指标模块,其中反应的目地向量是 T_i 、 S_i 、 M_i 。超短激光微加工优化的决策目标是反映硬化层机械性能的目标向量 M_i ,以约束条件的形式在参数优化的过程中兼顾目标向量 T_i 、 S_i 。

可将目标向量 M_i 细分为硬化层分布均匀性 D 、表面层深 Z 和表面硬度 H ,即:

$$M_i = M_i R_a(H, Z, D) \quad (11)$$

为了对硬化层分布平均性指标 D 开展划分,得到纵截面硬化层划分平均性 D_l 和横截面硬化层划分平均性 D_c 。经过如上总结,获得超短激光微加工抛光参数优化的递阶结构,如图2所示。

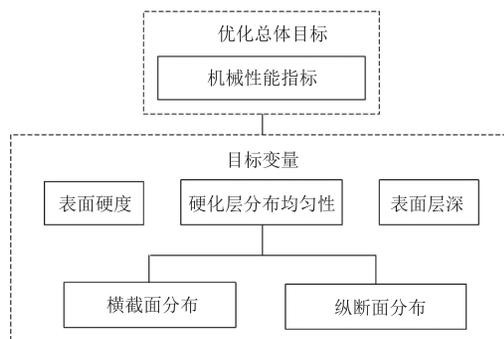


图2 超短激光微加工抛光参数优化目标

Fig.2 Optimization objective of ultra-short laser micromachining polishing parameters

硬化层深用扫描速度 v 和激光功率 P 两个主要参数所决定,实际上当层深明确时, $P-v$ 的组合有无数种,差别组合 $P-v$ 对截面内硬化层分布平均性和硬化层表层硬度带来的反响存在差别。纵截面硬化层分布经过超短激光扫描工艺的影响,纵截面内硬化层的分布平均性可通过分段扫描工艺得到显著改善,本工艺分为两个设计变量,分别为进端变速系数 λ_{in} 和出端变速系数 λ_{out} 。将扫描速度和激光功率合并为一个决策向量 X_i ,将变速系数 λ 和 $P-v$ 组合合并为决策向量 Y_i ,此时存在下式:

$$\begin{cases} X_i = M_i(P, v) \\ Y_i = M_i(P - v, \lambda) \end{cases} \quad (12)$$

超短激光微加工下的温度响应和温度分布受上述优化决策变量的直观感染,硬化层分散形态、层深和外表硬度经过温度场定夺,决策变化量到目标变化量当中映射可经过温度场 θ 完成:

$$\begin{cases} H = H[\theta(P - v)(X_i - Y_i)] \\ Z = Z[\theta(P - v)(X_i - Y_i)] \\ D = D[\theta(P - v, \lambda)(X_i - Y_i)] \end{cases} \quad (13)$$

通过上述分析可知,超短激光微加工的优化疑问通常形容的是优化 $P-v$ 组合和有关变量,改进激光扫描工艺方法而达成的,则超短激光微加工数学优化模型如下:

$$M_i = M_i(H, Z, D) \left\{ \begin{array}{l} H = H[\theta(P - v)] \\ Z = Z[\theta(P - v)] \\ D = D[\theta(P - v, \lambda)] \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \max H = H(P - v) \\ \max Z = Z(P - v) \\ \max D = D(P - v, \lambda) \end{cases} \quad (14)$$

通过上述超短激光微加工数学优化模型实现对

表面激光微加工的全面优化,从而获得满足特定需求的最佳加工结果。

4 实验及分析

4.1 实验环境

为了验证超短激光微加工数学建模优化分析方法的整体有效性,需要进行实验测试,本次测试在 Matlab 平台中完成。所提方法对超短激光微加工进行优化的前提是构建数学模型,数学模型的精度决定了超短激光微加工的优化效果,表 1 为超短激光微加工参数信息表。实验环境如图 3 所示。

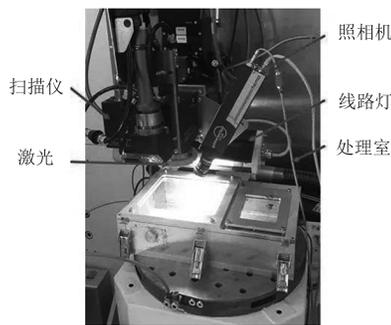


图 3 实验环境

Fig. 3 Experimental environment

表 1 超短激光微加工参数

Tab. 1 Ultrashort laser microprocessing parameters

参数	规格
气压/Kpa	200 ~ 300
能量/W	1500
工作负载	18
时间/s	3 ~ 5
频率/V	150 ~ 200
速度/(mm · min ⁻¹)	4000 ~ 6000

根据上述参数设定进行超短激光微加工优化,流程如下所示:

(1) 确定优化目标:明确本次优化的目标,寻找最优的硬化层几何形貌、组织形态和机械功能。

(2) 建立优化模型:将硬化层分布均匀性、表面层深和表面硬度作为优化目标建立优化模型。

(3) 确定约束条件:根据实际工艺条件和限制,将激光功率和扫描速度作为约束条件。

(4) 求解优化问题:根据建立的优化模型和约束条件,进行求解。

(5) 验证优化结果:通过仿真实验验证优化结

果是否有效,分别选用模型精度、加工精度、加工时间与优化前后的表面粗糙度进行测试。

通过对所建立的模型进行精度测试,可以评估模型在预测和优化超短激光抛光参数方面的准确性;加工精度测试可提供关于加工精度的定量评估,并判断是否满足设计要求;通过对优化前后的表面粗糙度进行测试,可以评估超短激光的优化效果,判断优化后的超短激光微加工是否能够有效地改善表面质量。

4.2 实验参数

超短激光微加工精度是指在使用超短激光进行微细加工过程中,所能达到的加工精度水平。加工精度是评估加工结果与设计要求的差异程度。在超短激光微加工中,加工精度通常表示为加工所产生结构的尺寸或形态与设计要求的偏差。表达式为:

$$A = \frac{A_d - A_c}{A_c} \times 100 \% \quad (15)$$

其中, A_d 为实际加工尺寸; A_c 为设计要求尺寸。

表面粗糙度 R 是指材料表面的不规则程度或凹凸不平的程度。通过测量和比较抛光前后的表面粗糙度,可以评估抛光效果的好坏。其表达式如下:

$$R = \frac{1}{L} \int |z(x) - z_0(x)| dx \quad (16)$$

其中, L 为测量长度; $z(x)$ 表示在 x 位置上的表面高度测量值; $z_0(x)$ 为该位置上的基准线。

4.3 实验结果

基于上述实验环境,进行模型精度、加工精度与表面粗糙度的实验分析。关于提出的数学模型进行精度检测,检测成果为表 2。

表 2 模型精度测试结果

Tab. 2 Model accuracy test results

实验次数	模型精度/%
1	90.45
2	91.45
3	95.47
4	94.65
5	93.77
平均精度	93.158

分析表 2 中的数据可知,在多次实验中所提方法构建的模型精度均在 90 % 以上,5 次实验的平均精度高达 93.158 %。因为该方法在构建数学模型之前分析了超短激光微加工产生的热累积作用,根

据分析结果构建数学模型,提高了模型的精度。

将加工精度和加工时间作为测试指标,对所提方法、AFRP 激光优化方法和水导激光优化方法的步骤开始检测,检测成果如图 4 所示。

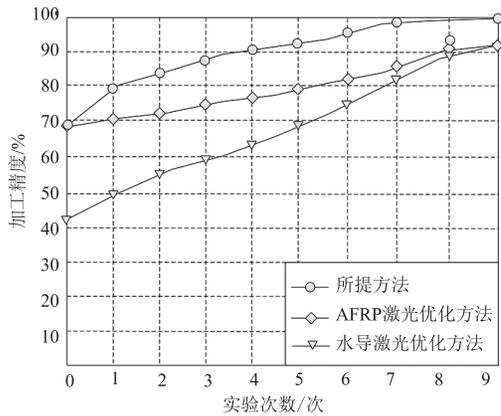


图 4 加工精度测试结果

Fig.4 Machining accuracy test results

分析图 4 中的数据可知,所提方法的加工精度高于 AFRP 激光优化方法和水导激光优化方法的加工精度,最高加工精度达 99 %。是因为所提方法对超短激光微加工在表面产生的热累积作用进行了分析,为数学模型的构建提供了相关依据,通过高精度的数学模型对超短激光微加工进行优化,有效增加了加工的精度,具有一定的技术水平及实用性。

为进一步验证本文方法的优化性能,以优化前后的表面粗糙度 R 为测试指标,进行测试,结果如表 3 所示。

表 3 优化前后的表面粗糙度结果

Tab.3 Surface roughness results before and after optimization

实验次数	粗糙度/%			
	优化前	本文方法优化	AFRP 激光优化方法优化	水导激光优化方法优化
1	89	5	19	20
2	88	6	15	21
3	89	5	16	22
4	90	8	14	19
5	85	6	16	20
6	88	8	15	19
7	86	6	14	18
8	89	7	16	18
9	90	5	18	20
10	86	6	16	22

分析表 3 中的数据可知,在多次实验中本文优化后的粗糙度始终在 10 % 以下,最低时仅为 5 %,相较于原始的粗糙度下降幅度较大。对比方法的粗糙度也有效下降,最低分别下降到了 14 % 与 18 %,但仍高于本文方法。说明本文方法的超短激光微加工优化效果较好,具有实用性。

为进一步判断优化后的超短激光微加工是否能够有效地改善表面质量,以光洁度与均匀度为表面质量的评价指标进行对比测试,结果如图 5、图 6 所示。

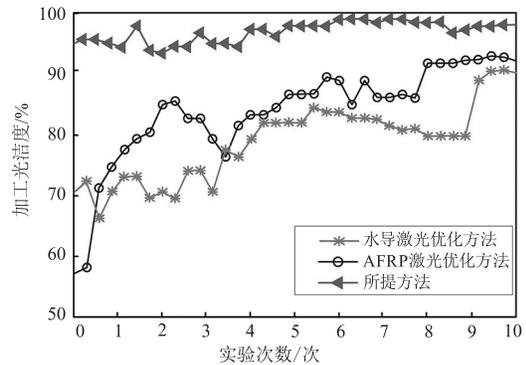


图 5 光洁度测试结果

Fig.5 Finish test results

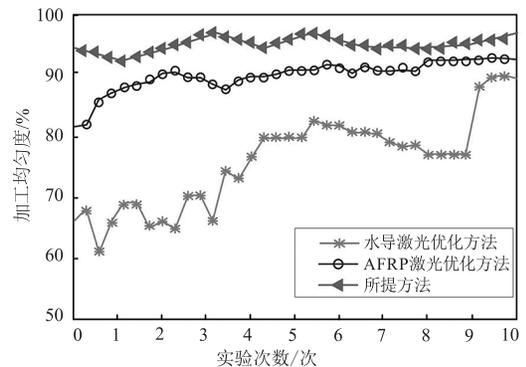


图 6 均匀度测试结果

Fig.6 Uniformity test results

根据上述结果可以看出,随着迭代次数的增加,所提方法的光洁度与均匀性均达到了 90 % 以上,而对比方法明显低于本文方法,由此表明所提方法能够有效改善表面质量,在提高超短激光微加工表面质量方面具有显著优势,并且具有很高的实用价值。该研究结果对于超短激光微加工技术的发展和應用具有重要意义。

5 结论

提出超短激光微加工数学建模优化分析方法,根据超短激光微加工产生的热累积作用构建数学模

型,在数学模型的基础上对抛光参数进行优化,并构建超短激光微加工数学优化模型,实现优化分析。优化后的加工结果表明,在平均加工精度达到99%的情况下,最低粗糙度仅为5%,证明该优化方法具有较好的实用性和效果。该研究为超短激光微加工提供了一种数学建模优化分析的方法,能够有效地改善传统优化方法无法准确分析复杂关系所带来的优化性能差的问题。同时,该方法在提高加工精度、改善表面质量方面取得了较好的效果,也为超短激光微加工的研究提供了新的思路和方法。

参考文献:

- [1] Zhong Lin, Wang Zixuan, Yan Yonghong, et al. Picosecond laser processing key parameters of dimples on Ni60/WC coating surface [J]. *Surface Technology*, 2023, 52(7):348-357,443. (in Chinese)
钟林,王紫萱,阎永宏,等. Ni60/WC 涂层表面圆凹坑皮秒激光加工关键参数研究[J]. *表面技术*, 2023, 52(7):348-357,443.
- [2] Ming Xingzu, Fan Binrui, Zhou Xian, et al. Multi-objective optimization of process parameters for femtosecond laser machining of face gears [J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(4):513-521. (in Chinese)
明兴祖,樊滨瑞,周贤,等. 飞秒激光精修面齿轮工艺参数的多目标优化[J]. *激光与红外*, 2023, 53(4):513-521.
- [3] Li Wenyi, Su Fei, Zheng Lei, et al. Research on AFRP laser-milling combined machining technology and parameters optimization [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2023, 53(5):68-77. (in Chinese)
李文毅,苏飞,郑雷,等. AFRP 激光-铣削组合加工及其工艺参数优化研究[J]. *宇航材料工艺*, 2023, 53(5):68-77.
- [4] Tang Wenhan, Sun Dong, Han Fuzhu. Optimization of process parameters for water-jet guided laser processing of CFRP based on response surface model [J]. *Electromachining & Mould*, 2023, (1):44-49. (in Chinese)
唐文翰,孙冬,韩福柱. 基于响应面法的水导激光加工碳纤维复合材料工艺参数优化[J]. *电加工与模具*, 2023, (1):44-49.
- [5] Qu S, Meng F, Chen L, et al. Parameter optimization of ultrasonic vibration polishing K9 optical glass based on ultrasonic atomization [J]. *Ceramics International*, 2022, (14):48.
- [6] Zhou Ping, Wang Feng. Optimization of main machining parameters for ultrasonic rolling of iron-based laser cladding layer [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2023, (10):22-27. (in Chinese)
周平,王峰. 铁基激光熔覆层超声滚压主加工参数优化实验[J]. *制造技术与机床*, 2023, (10):22-27.
- [7] Yuan Hongwei, Rao Shenglong, Wu Dong, et al. Fabrication and rotation driving of movable microstructures based on femtosecond laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3):75-81. (in Chinese)
袁宏伟,饶生龙,吴东,等. 基于飞秒激光的可运动微结构加工与旋转驱动[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3):75-81.
- [8] Zhuang Yu, Guo Y L, Li J, et al. Study on selective laser sintering processing of blood vessel-like polyurethane based composite [J]. *Materials Review*, 2020, 34(10):181-185. (in Chinese)
庄煜,郭艳玲,李健,等. 仿血管聚氨酯基复合材料的激光烧结工艺研究[J]. *材料导报*, 2020, 34(10):181-185.
- [9] Wan Zehong, Deng Hongyang, Lei Yu, et al. Low-damage micromachining for 4H-SiC pressure sensitive diaphragm by femtosecond Laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(1):66-78. (in Chinese)
万泽洪,邓鸿洋,雷宇,等. 4H-SiC 压力敏感膜片的低损伤飞秒激光加工[J]. *光子学报*, 2023, 52(1):66-78.
- [10] Chen X, Ke J Y, She Z D, et al. Optimization of process parameters and surface characteristics in laser-assisted ultra-precision cutting of monocrystalline silicon [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(1):99-108. (in Chinese)
陈肖,柯金洋,佘中迪,等. 单晶硅激光辅助超精密切削工艺优化与表面特性[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(1):99-108.
- [11] Wang G, Chen G H, Zhu J Y, et al. Effect of laser machining process parameters on the quality of grooving of 36MnVS4 connecting rod research [J]. *Laser Journal*, 2023, 44(8):198-205. (in Chinese)
王冠,陈国华,诸杰煜等. 激光加工工艺参数对 36MnVS4 连杆切槽质量影响研究[J]. *激光杂志*, 2023, 44(8):198-205.
- [12] Yang Qibao, Yuan Wenbing, Wang Yutao, et al. Study on

- the mechanism and microhardness of Ti6Al4V nanosecond laser polishing in argon atmosphere [J]. Applied Laser, 2021, 41(5):997-1003. (in Chinese)
- 杨奇彪,袁文兵,汪于涛,等. 氩气氛围下 Ti6Al4V 纳秒激光抛光机理及显微硬度研究 [J]. 应用激光, 2021, 41(5):997-1003.
- [13] Yi Liwen. Optimization of laser grinding hole parameters of ZrO₂ superhard materials assisted by ultrasonic vibration [J]. Shanxi Metallurgy, 2023, 46(7):45-46, 49. (in Chinese)
- 易礼文. ZrO₂ 高硬材料超声振动激光磨削孔加工参数优化 [J]. 山西冶金, 2023, 46(7):45-46, 49.
- [14] Pei Hongjie, Chen Yuying, Li Gongan, et al. Surface roughness prediction based on copula EDA optimization of BP neural network [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2020, 41(3):366-372. (in Chinese)
- 裴宏杰,陈钰莹,李公安,等. 基于 Copula EDA 优化 BP 神经网络的面粗糙度预测 [J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2020, 41(3):366-372.