

纳秒脉冲激光铣削 Al_2O_3 陶瓷工艺参数的优化

许兆美^{1**}, 孟宪凯², 屈彦荣¹, 朱为国^{1*}, 郭召恒³

¹淮阴工学院江苏省先进制造技术重点实验室, 江苏 淮安 223003;

²江苏大学先进制造与现代装备技术工程研究院, 江苏 镇江 212013;

³江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 采用纳秒脉冲激光对 Al_2O_3 陶瓷进行激光铣削实验。使用响应面二阶回归模型建立铣削工艺参数与表面粗糙度、铣削深度之间的变化关系,通过灵敏度分析方法识别影响表面粗糙度和铣削深度的关键工艺参数;以最小化表面粗糙度和最大化铣削深度为优化目标,利用遗传算法确定理想的工艺参数组合,并进行实验验证。结果表明:基于响应面法的数学模型预测能力较强,铣削次数及搭接率对表面粗糙度和铣削深度的影响最为显著,优化参数下表面粗糙度与铣削深度的预测值分别为 $10.471\ \mu\text{m}$ 和 $120.526\ \mu\text{m}$,实验值分别为 $10.835\ \mu\text{m}$ 和 $131.277\ \mu\text{m}$,相对误差分别为 3.36% 和 8.19% 。

关键词 激光技术; 激光铣削; Al_2O_3 陶瓷; 响应面法; 工艺参数优化

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.231404

Process Parameter Optimization of Al_2O_3 Ceramics Milled with Nanosecond Pulsed Laser

Xu Zhaomei^{1**}, Meng Xiankai², Qu Yanrong¹, Zhu Weiguo^{1*}, Guo Zhaoheng³

¹Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu 223003, China;

²Institute of Advanced Manufacturing and Modern Equipment Technology Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

³School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract Herein, laser milling of Al_2O_3 ceramics is conducted using nanosecond pulsed laser. The relationship among milling process parameters, surface roughness, and milling depth is investigated using response surface second-order regression model. In addition, the key process parameters affecting surface roughness and milling depth are identified using sensitivity analysis. A genetic algorithm is used to determine the optimal process parameters that minimize the surface roughness and maximize the milling depth. These parameters are then experimentally verified. Results indicate a strong predictive ability of the mathematical model based on the response surface method. The number of milling times and overlap rate have the most significant effect on the surface roughness and milling depth. Under optimized parameters, the predicted surface roughness and milling depth are found to be $10.471\ \mu\text{m}$ and $120.526\ \mu\text{m}$, respectively, while their corresponding experimental values are $10.835\ \mu\text{m}$ and $131.277\ \mu\text{m}$, respectively. Therefore, the relative errors in case of surface roughness and milling depth are only 3.36% and 8.19% , respectively.

Key words laser technique; laser milling; Al_2O_3 ceramics; response surface method; optimization of process parameters

OCIS codes 140.3390; 240.5770; 310.3840; 350.3390

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-07-29; 录用日期: 2019-08-28

基金项目: 江苏省先进制造技术重点实验室开放基金(HGAMTL-1808)、江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)项目(BE2017001-2, BE2017001-1)、江苏省博士后科研资助计划(2018K014C)

* E-mail: 1229849292@qq.com; ** E-mail: fuyun588@163.com

1 引言

陶瓷材料因具有高比强度、高耐热性和电绝缘性能而被广泛应用于电子电气、化工机械和国防军工等行业^[1-3]。陶瓷具有硬度高、脆性大的特点,采用传统机械加工方法时,刀具磨损很大,且材料的去除率较低,从而使得陶瓷材料的加工具有极大的挑战性。

近年来,利用高能束实现陶瓷材料加工的先进制造技术得到了发展,例如,电子束打孔、等离子弧切割、激光铣削等^[4-5]。其中,激光铣削具有高能量密度、高效率以及精确可控等优点,已成为加工陶瓷材料的重要技术。Samant 等^[6]建立了激光铣削深度与陶瓷材料热物理性质的关系;Karnakis 等^[7]采用飞秒激光器对硅片进行微铣削后发现,铣削深度和激光能量密度之间呈对数关系;徐强等^[8]研究了强激光下陶瓷材料的铣削机理,主要包括材料的烧蚀氧化以及瞬时热应力破坏。确定合适的激光工艺参数是获得理想的陶瓷加工质量的关键。

李健等^[9]揭示了短脉激光工艺参数对钽稳定四方多晶氧化锆陶瓷(Y-TZP)铣削量和表面质量的影响规律;许兆美等^[10]采用模拟与实验方法研究了氧化铝(Al_2O_3)陶瓷激光铣削深度随工艺参数的变化规律;Wang 等^[11]研究了激光辅助水射流微铣削氮化硅(Si_3N_4)陶瓷技术,并利用响应面法获取了最优的工艺参数窗口;Pham 等^[12]对 Al_2O_3 与 Si_3N_4 陶瓷的激光铣削过程进行研究后获得了工艺参数对铣

削深度及表面质量的影响规律;Umer 等^[13]利用多目标遗传算法得到了 Al_2O_3 陶瓷理想的铣削质量;Kibria 等^[14]研究了圆柱形 Al_2O_3 陶瓷的激光微车削工艺,重点探讨了连续点重叠率和周向重叠率对表面粗糙度的影响;Campanelli 等^[15]采用纳秒 Nd:YAG 激光器对 5754 铝合金进行烧蚀,分析了激光参数对烧蚀深度、表面粗糙度的影响,并进行了多目标优化。

上述研究大多数侧重于单一工艺参数对单一输出变量的影响规律,但是影响铣削质量的因素众多,导致工艺参数优化具有较大的难度。本文采用纳秒脉冲激光对 Al_2O_3 陶瓷进行铣削实验,利用灵敏度分析方法确定了对铣削质量影响较大的工艺参数,并采用多目标遗传算法获得了最优的工艺参数解集。

2 实验设备及实验方法

2.1 实验材料及设备

实验材料为 Al_2O_3 陶瓷片,其尺寸为 $30\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,铣削表面的尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。激光铣削实验系统如图 1(a)所示,激光器为 YLP-HP100 型纳秒脉冲激光器,其最大功率为 100 W,波长为 1060 nm,光斑直径为 0.05 mm,重复频率为 10~100 kHz。图 1(b)为激光铣削原理示意图,激光束辐照到 Al_2O_3 陶瓷片表面使其局部瞬间熔化甚至气化,熔融物在膨胀诱导反冲力的作用下喷出,从而实现材料的逐层去除^[16]。

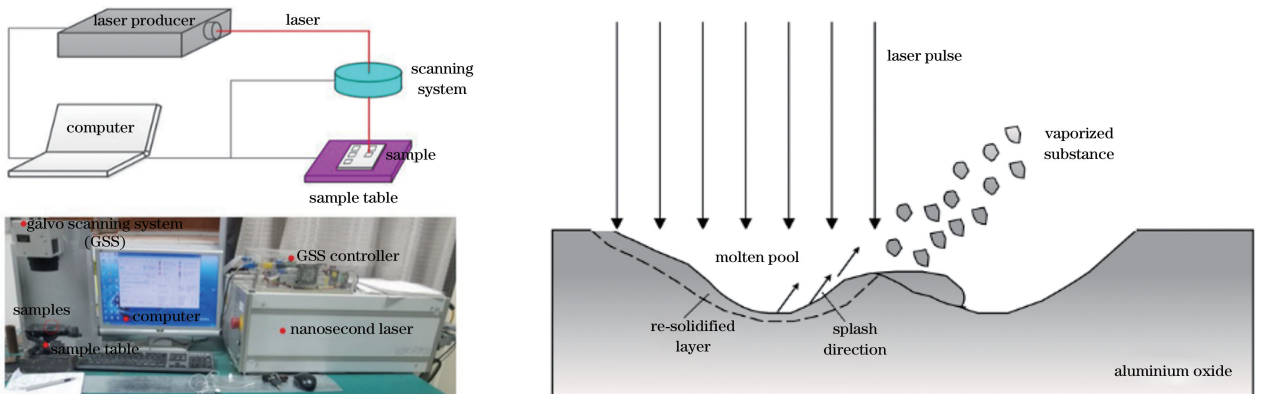


图 1 激光铣削实验系统及激光铣削原理示意图。(a)实验系统;(b)铣削原理示意图

Fig. 1 Experimental system of laser milling and principle of laser milling. (a) Experimental system; (b) milling schematic

2.2 实验方法

铣削深度与表面质量都是通过激光功率、光斑搭接率等激光加工参数进行控制的。采用中心复合设计(CCD)方法进行实验规划。激光铣削的主要工艺参数包括搭接率、激光功率、铣削次数和重复频

率,每个工艺参数取 5 个水平。在单因素实验的基础上,确定如表 1 所示的参数水平。

首先,使用 VK-X160 型激光共聚焦显微镜观察铣削表面的三维形貌、表面粗糙度(R_a)。然后,对铣削区域截面进行轮廓分析,获得铣削深度(M)。

表1 工艺参数及其取值范围

Table 1 Process parameters and their value ranges

Parameter	Notation	Unit	Level				
			-2	-1	0	1	2
Overlap rate	O	%	70	75	80	85	90
Laser power	P	W	20	25	30	35	40
Times	N	-	1	2	3	4	5
Repetition frequency	F	kHz	30	35	40	45	50

取表面粗糙度和铣削深度为铣削质量的表征量。实验设计矩阵及结果如表2所示。最后,采用响应面二次多项式拟合输入变量与输出响应的近似函数关系,以最大化铣削深度及最小化表面粗糙度为优化目标,采用多目标遗传算法对激光铣削工艺参数进行优化,以获得最优工艺参数解集。

表2 实验设计矩阵及结果

Table 2 Experimental design matrix and results

No.	O / %	P / W	N	F / kHz	R_a / μm	M / μm
1	85	35	2	35	15.208	46.515
2	80	30	3	40	9.890	47.879
3	80	30	3	30	8.325	41.299
4	80	30	3	40	9.890	47.879
5	85	35	4	35	13.537	80.920
6	80	30	1	40	8.115	26.826
7	80	20	3	40	6.265	25.588
8	80	30	3	40	9.890	47.879
9	85	25	2	45	10.025	45.272
10	80	30	3	50	10.297	61.911
11	80	30	5	40	12.984	77.373
12	85	25	4	45	9.782	75.285
13	75	25	4	35	6.726	26.160
14	85	25	2	35	10.006	44.521
15	80	30	3	40	9.890	47.879
16	75	25	2	45	7.828	27.382
17	90	30	3	40	15.198	72.113
18	75	25	4	45	8.625	50.697
19	80	30	3	40	9.890	47.879
20	85	35	2	45	13.171	48.069
21	80	40	3	40	11.582	58.944
22	85	35	4	45	12.632	88.637
23	85	25	4	35	9.425	59.550
24	75	35	2	45	9.032	33.958
25	70	30	3	40	7.361	23.022
26	75	35	4	45	10.482	62.510
27	75	35	4	35	10.125	49.719
28	75	35	2	35	6.871	28.622
29	75	25	2	35	5.987	22.584
30	80	30	3	40	9.890	47.879

3 实验结果与讨论

3.1 激光铣削工艺数学模型的建立与分析

将搭接率、激光功率、铣削次数和重复频率视为输入变量,将表面粗糙度和铣削深度视为输出响应,使用响应面二次多项式拟合输入变量与输出响应的近似函数关系。响应面二阶回归模型^[17-18]为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

式中: y 为输出变量; x_i 、 x_j 为输入变量; β_0 为常数; β_i 为线性系数; β_{ii} 为平方项系数; β_{ij} 为交互项系数。对表2数据进行拟合后可以得到铣削质量与工艺参数的函数方程式如下:

$$R_a = -25.26474 - 1.03947 \times O - 0.27893 \times P + 8.46833 \times N + 2.35222 \times F + 0.019915 \times O \times P - 0.11592 \times O \times N - 0.02206 \times O \times F + 0.022275 \times P \times N - 0.01135 \times P \times F - 3.45 \times 10^{-3} \times N \times F + 0.012732 \times O^2 - 0.010828 \times P^2 + 0.13579 \times N^2 - 1.95333 \times 10^{-3} \times F^2, \quad (2)$$

$$M = -213.33641 + 2.96845 \times O + 5.80773 \times P - 82.34815 \times N + 1.3412 \times F - 0.021183 \times O \times P + 0.54344 \times O \times N - 0.054263 \times O \times F + 0.65861 \times P \times N - 0.046058 \times P \times F + 0.60426 \times N \times F + 3.65542 \times 10^{-3} \times O^2 - 0.04936 \times P^2 + 1.22439 \times N^2 + 0.04403 \times F^2. \quad (3)$$

图2(a)、(b)分别给出了工艺参数对激光铣削表面粗糙度及铣削深度的交互式影响趋势。对上述模型进行统计学评价的结果如表3所示。拟合度的取值范围为0~1,越接近于1说明拟合偏差越小;adequate precision表示模型的信噪比,其值大于4表明模型的预测能力具有较高的稳定性; p 值小于0.05表明差异具有统计学意义^[19]。图3(a)、(b)分别为表面粗糙度和铣削深度预测值与实验结果的对比如。

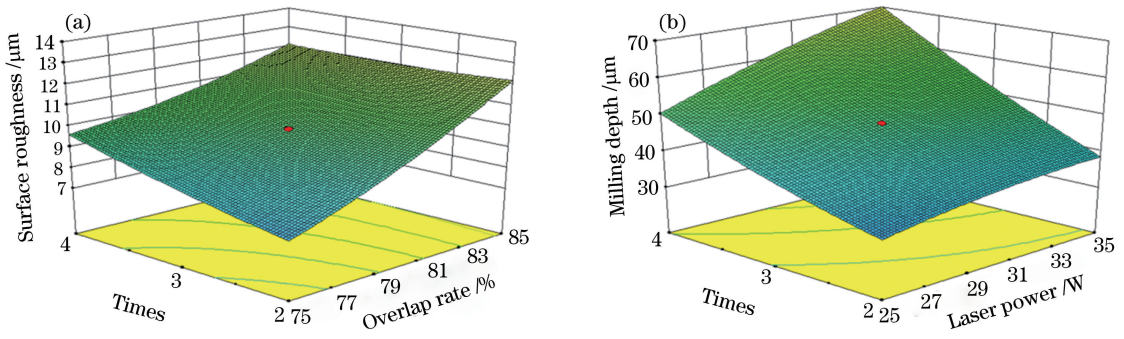


图 2 工艺参数对铣削质量的交互式影响。(a)对表面粗糙度的影响;(b)对铣削深度的影响

Fig. 2 Interactive effects of process parameters on milling quality. (a) Effect on surface roughness; (b) effect on milling depth

表 3 响应面模型的统计学评价

Table 3 Statistical evaluation of response surface model

Parameter	Number of data points	Fitting degree	Adequate precision	<i>p</i> -value
Model of surface roughness	30	0.9404	16.855	<0.0001
Model of milling depth	30	0.9905	41.265	<0.0001

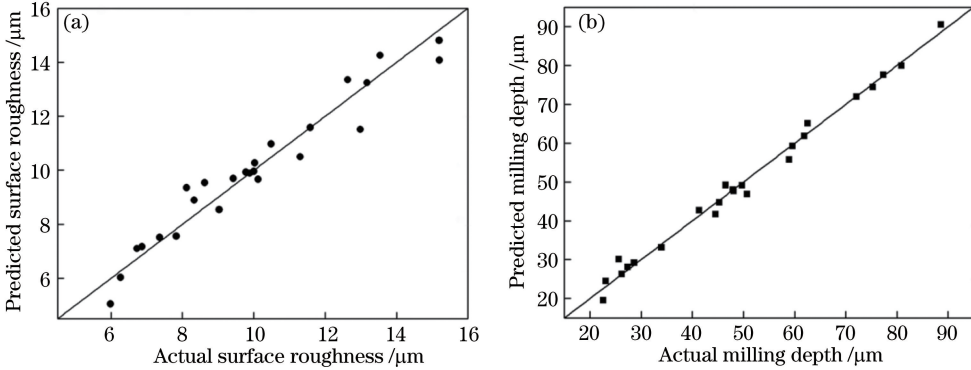


图 3 预测值与实际值的对比。(a)表面粗糙度;(b)铣削深度

Fig. 3 Comparison of predicted and actual values. (a) Surface roughness; (b) milling depth

3.2 灵敏度分析

3.2.1 灵敏度方程的推导

目标函数对输入变量的灵敏度是该函数相对于其变量的偏导数^[20-21]。为了获得搭接率对铣削质量的灵敏度方程,分别对(2)、(3)式以搭接率 *O* 为自变量求偏导,得到搭接率对表面粗糙度和铣削深度的灵敏度方程:

$$\frac{\partial(R_a)}{\partial(O)} = -1.03947 + 0.019915 \times P - 0.11592 \times N - 0.02206 \times F + 0.025464 \times O, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(M)}{\partial(O)} = 2.96845 - 0.021183 \times P + 0.54344 \times N - 0.054263 \times F + 7.31084 \times 10^{-3} \times O. \quad (5)$$

同理,激光功率、铣削次数和重复频率对铣削质量的灵敏度方程如下:

$$\frac{\partial(R_a)}{\partial(P)} = -0.27893 + 0.019915 \times O + 0.022275 \times N - 0.01135 \times F - 0.021656 \times P, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(M)}{\partial(P)} = 5.80773 - 0.021183 \times O + 0.65861 \times N - 0.046058 \times F - 0.09872 \times P, \quad (7)$$

$$\frac{\partial(R_a)}{\partial(N)} = 8.46833 - 0.11592 \times O + 0.022275 \times P - 3.45 \times 10^{-3} \times F + 0.27158 \times N, \quad (8)$$

$$\frac{\partial(M)}{\partial(N)} = -82.34815 + 0.54344 \times O + 0.65861 \times P + 0.60426 \times F + 2.44878 \times N, \quad (9)$$

$$\frac{\partial(R_a)}{\partial(F)} = 2.35222 - 0.02206 \times O - 0.01135 \times P - 3.45 \times 10^{-3} \times N - 3.90666 \times 10^{-3} \times F, \quad (10)$$

$$\partial(M)/\partial(F) = 1.3412 - 0.054263 \times O - 0.046058 \times P + 0.60426 \times N + 0.08806 \times F. \quad (11)$$

3.2.2 灵敏度结果分析

灵敏度为正值说明输出响应随输入变量的增大而增大,灵敏度为负值说明输出响应随输入变量的增大而减小。同时,灵敏度绝对值越大,贡献率越高^[22]。

图4所示为搭接率对表面粗糙度和铣削深度的灵敏度计算结果。由图4可知:搭接率对表面粗糙度和铣削深度的灵敏度均为正值,说明表面粗糙度和铣削深度均随搭接率的增大而增大;随着搭接率增大,表面粗糙度和铣削深度的灵敏度均逐渐增大,表明搭接率在较高水平时对铣削质量的影响较大;搭接率对铣削深度的灵敏度明显大于对表面粗糙度的灵敏度。

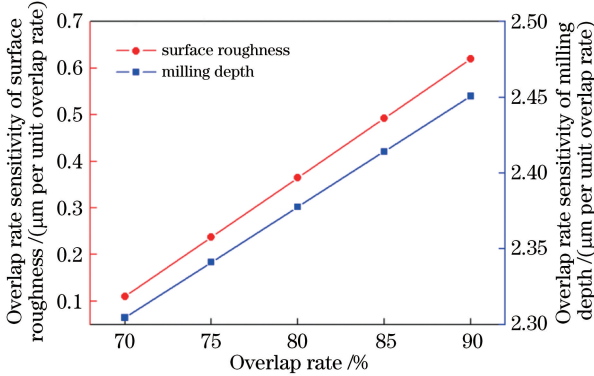


图4 搭接率对铣削质量的灵敏度分析结果

(激光功率为30 W,铣削次数为3,重复频率为40 kHz)

Fig. 4 Analysis results of sensitivity of overlap rate to milling quality (laser power is 30 W, milling times is 3, and laser repetition rate is 40 kHz)

图5所示为激光功率对表面粗糙度和铣削深度的灵敏度分析结果。可以看出:激光功率对两者的灵敏度均为正值,说明表面粗糙度和铣削深度均随着激光功率的增大而增大;激光功率对铣削深度的灵敏度远大于表面粗糙度的灵敏度,表明激光功率对铣削深度的影响更显著。

图6所示为铣削次数对表面粗糙度和铣削深度的灵敏度分析结果。可以看出:随着铣削次数增多,表面粗糙度和铣削深度均增大,这是因为当其他条件不变时,多次重复铣削在提高材料去除量的同时也影响了材料表面的加工质量;铣削次数对铣削深度的贡献率更大。

由图7可知:重复频率对表面粗糙度和铣削深度的灵敏度均为正值,说明重复频率对两者的变化

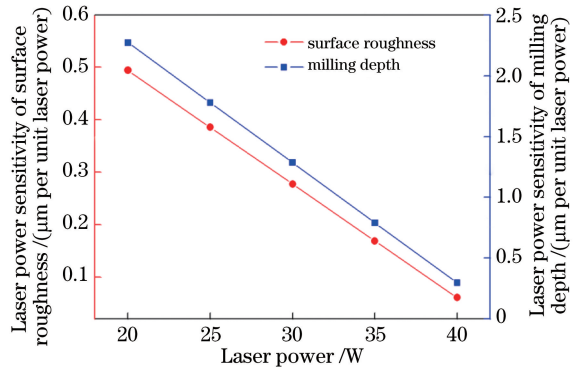


图5 激光功率对铣削质量的灵敏度分析结果

(搭接率为80%,铣削次数为3,重复频率为40 kHz)

Fig. 5 Analysis results of sensitivity of laser power to milling quality (overlap rate is 80%, milling times is 3, and laser frequency is 40 kHz)

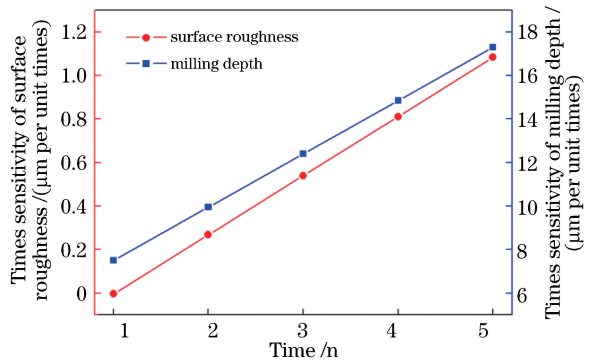


图6 铣削次数对铣削质量的灵敏度分析结果

(搭接率为80%,激光功率为30 W,重复频率为40 kHz)

Fig. 6 Analysis results of sensitivity of laser milling times to milling quality (overlap rate is 80%, laser power is 30 W, and laser repetition rate is 40 kHz)

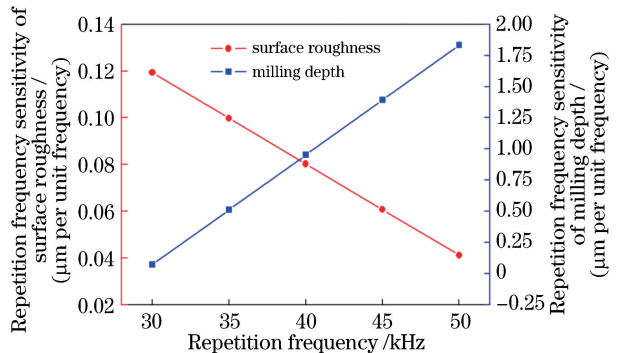


图7 重复频率对铣削质量的灵敏度分析结果

(搭接率为80%,激光功率为30 W,铣削次数为3)

Fig. 7 Analysis results of sensitivity of laser frequency to milling quality (overlap rate is 80%, laser power is 30 W, and milling times is 3)

均为正影响;然而,表面粗糙度的灵敏度逐渐减小,铣削深度的灵敏度逐渐增大,这表明重复频率处于

低水平时,对表面粗糙度的影响较为显著;随着重复频率增大,其对铣削深度的影响明显增强;重复频率对铣削深度的影响更大。

3.3 多目标参数优化及实验验证

本文以获得最大铣削深度和最小表面粗糙度为优化目标,利用多目标遗传算法进行工艺参数的优选^[23]。该多目标优化问题可表示如下:

优化目标为最大化铣削深度和最小化表面粗糙度;取值范围为 $70 \leq O \leq 90, 20 \leq P \leq 40, 1 \leq N \leq 5, 30 \leq F \leq 50$

在优化过程中采用遗传算法搜寻目标函数的最小值,因此将多目标优化函数设定为 $-M$ 和 $+R_a$ 。此外,将遗传算法的种群数量设为 100,最大进化代数设为 300,最优个体系数设为 0.3,适应度函数偏差设为 10^{-5} 。

图 8 所示为多目标参数优化的最优解集,其中每一点均代表一个独立的最优解。取图中三角形

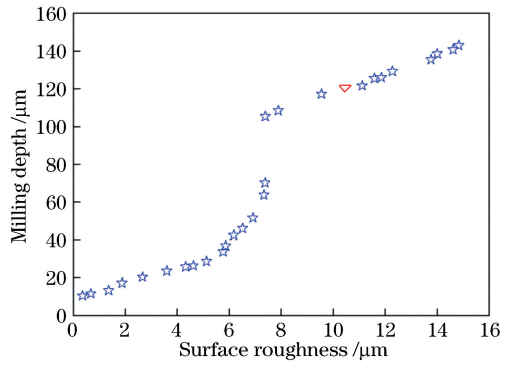


图 8 多目标优化结果

所示的优化参数 ($O = 90\%$, $P = 25.6\text{ W}$, $N = 5$, $F = 50\text{ kHz}$)进行实验验证,优化计算得到的 $R_a = 10.471\ \mu\text{m}$, $M = 120.526\ \mu\text{m}$ 。实验后,在激光铣削区域取区域 1~9 共 9 个区域,如图 9 所示,依次测量其表面粗糙度,得到平均 R_a 为 $10.835\ \mu\text{m}$,实验值与优化值的偏差仅为 3.36%。

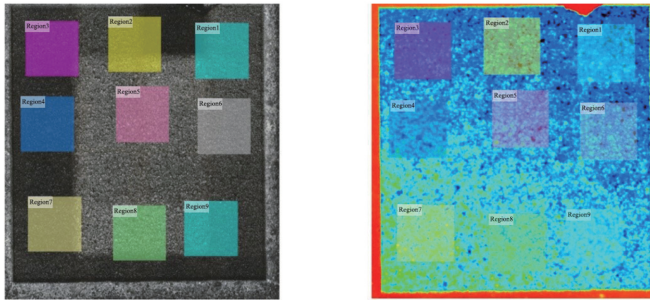


图 9 表面粗糙度的测量区域

Fig. 9 Measurement area of surface roughness

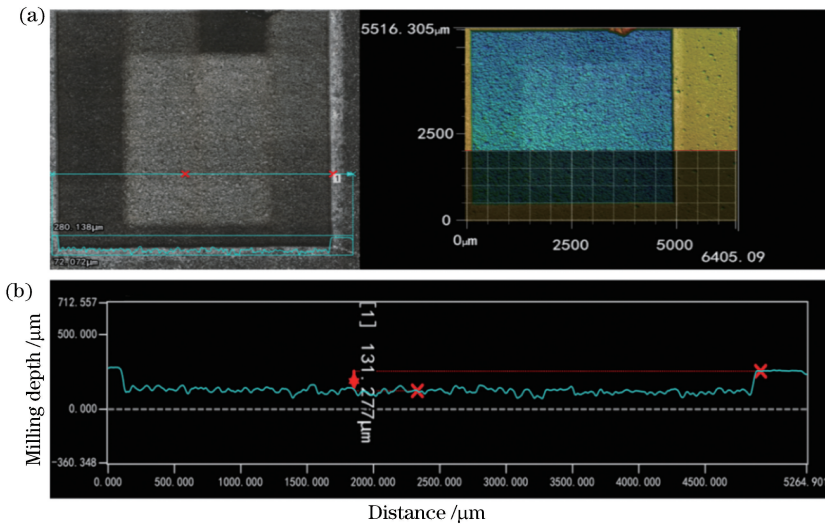


图 10 激光铣削的三维形貌和截面轮廓。(a)三维形貌;(b)截面轮廓(搭接率为 90%,激光功率为 25.6 W, 铣削次数为 5,重复频率为 50 kHz)

Fig. 10 Three-dimensional topography and sectional profile after laser milling. (a) Three-dimensional topography; (b) sectional profile (overlap rate is 90%, laser power is 25.6 W, milling times is 5, and laser repetition rate is 50 kHz)

激光铣削后的表面形貌如图 10(a)所示,图中箭头所示截面轮廓如图 10(b)所示,可以看出,在优化参数下, $M=131.277 \mu\text{m}$,与优化值的相对误差为 8.19%。综上所述,优化预测结果与实验结果的一致性较好。

图 11 所示为在优化参数下激光铣削前后陶瓷表面的微观组织。可以看出,激光铣削前后微观组织发生了明显变化:激光铣削前,陶瓷表面较为

光滑,且存在一些气孔类的加工缺陷,如图 11(b)所示;激光铣削后,陶瓷表面主要由气孔、熔融物质和少量沉积颗粒组成,如图 11(c)所示。与原始陶瓷的表面粗糙度($3.7 \mu\text{m}$)相比,激光铣削后陶瓷的表面粗糙度约增大了 2 倍。根据图 8 的优化结果可知,可以通过降低激光功率和光斑搭接率、增大重复频率等措施来降低表面粗糙度,但铣削深度会随之减小。

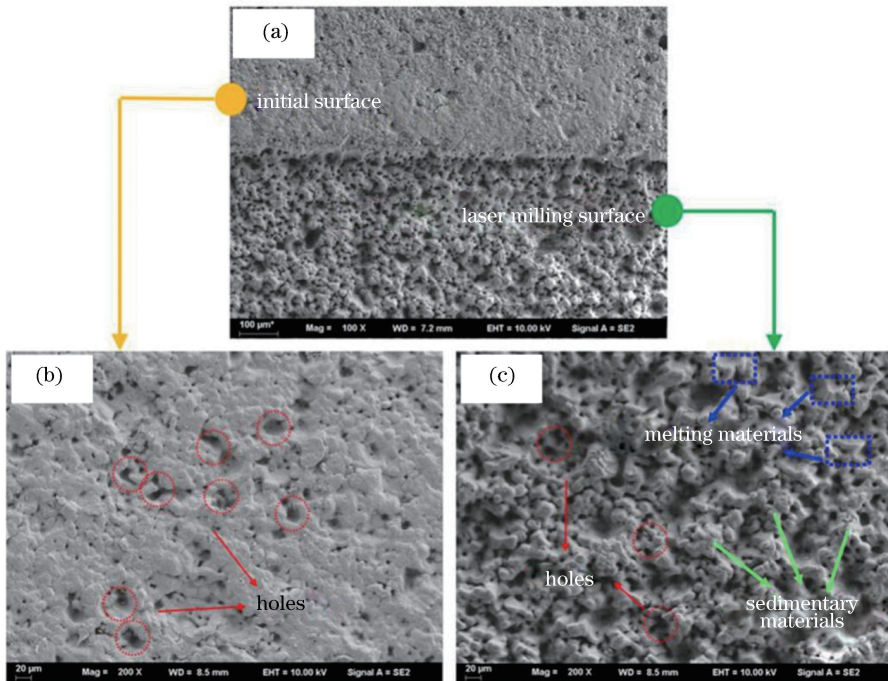


图 11 激光铣削前后陶瓷表面的微观组织。(a)初始表面与铣削表面;(b)初始表面放大图(搭接率为 90%,激光功率为 25.6 W,铣削次数为 5,重复频率为 50 kHz)

Fig. 11 Microstructures of ceramic surface before and after laser milling. (a) Initial surface and milled surface; (b) partial enlargement of initial surface; (c) partial enlargement of milled surface (overlap rate is 90%, laser power is 25.6 W, milling times is 5, and laser repetition rate is 50 kHz).

4 结 论

采用灵敏度分析方法研究了 Al_2O_3 陶瓷激光铣削过程中工艺参数的变化规律,确定了影响激光铣削表面粗糙度和铣削深度的关键参数,利用多目标遗传算法获得了理想铣削质量下的最优工艺参数解集。主要的主要结论如下:1)利用响应面二阶回归模型建立了激光铣削输入工艺参数与表面粗糙度、铣削深度之间的变化关系,该模型的拟合偏差小,预测激光铣削质量能力的稳定性较强。2)灵敏度分析结果表明,铣削次数和搭接率对表面粗糙度和铣削深度的影响最大,其次为激光功率和重复频率;另外,可以通过降低激光功率和光斑搭接率、增大重复频率等措施来降低铣削表面粗糙度,但铣削

深度会明显降低。3)对优化参数进行了实验验证,结果表明激光铣削后的表面粗糙度和铣削深度的实验值及预测值的相对误差分别为 3.36%和 8.19%。

参 考 文 献

- [1] Leone C, Genna S, Tagliaferri F, *et al.* Experimental investigation on laser milling of aluminium oxide using a 30 W Q-switched Yb : YAG fiber laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 76: 127-137.
- [2] Kibria G, Doloi B, Bhattacharyya B. Experimental investigation and multi-objective optimization of Nd : YAG laser micro-turning process of alumina ceramic using orthogonal array and grey relational analysis [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48: 16-27.

- [3] Yao Y S, Chen Q B, Wang J, *et al.* Water-jet assisted laser precision processing of Si_3N_4 ceramics [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(11): 2723-2731.
姚燕生, 陈庆波, 汪俊, 等. 氮化硅陶瓷水射流辅助激光精密加工[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2723-2731.
- [4] Biswas R, Kuar A S, Mitra S. Process optimization in Nd : YAG laser microdrilling of alumina-aluminium interpenetrating phase composite [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2015, 4(3): 323-332.
- [5] Lu F, Tian X L, Wu Z Y. Experiment on plasma arc thermal cutting of the engineering ceramics [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2007, 21(1): 81-83.
卢芳, 田欣利, 吴志远. 等离子弧加热切削工程陶瓷试验[J]. 装甲兵工程学院学报, 2007, 21(1): 81-83.
- [6] Samant A N, Dahotre N B. Differences in physical phenomena governing laser machining of structural ceramics[J]. Ceramics International, 2009, 35(5): 2093-2097.
- [7] Karnakis D, Rutterford G, Knowles M, *et al.* Laser micro-milling of ceramics, dielectrics and metals using nanosecond and picosecond lasers [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2006, 6106: 6106131-6106134.
- [8] Xu Q, Shao Z S, Zhu S Z, *et al.* Laser ablation behavior of $\text{ZrB}_2\text{-ZrC}$ ultra high temperature ceramics [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(S1): 533-536.
徐强, 邵正山, 朱时珍, 等. $\text{ZrB}_2\text{-ZrC}$ 超高温陶瓷激光烧蚀行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(S1): 533-536.
- [9] Li J, Ji L F, Hu Y, *et al.* Experimental study on milling of Y-TZP ceramic by 532 nm laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0806002.
李健, 季凌飞, 胡炎, 等. 532 nm 激光铣削 Y-TZP 陶瓷实验研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0806002.
- [10] Xu Z M, Hong Z H, Jiang S Q, *et al.* Finite element simulation and experimental research in laser milling of Al_2O_3 ceramic [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s214009.
许兆美, 洪宗海, 蒋素琴, 等. Al_2O_3 陶瓷激光铣削有限元模拟与实验研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s214009.
- [11] Wang L, Huang C Z, Wang J, *et al.* An experimental investigation on laser assisted waterjet micro-milling of silicon nitride ceramics [J]. Ceramics International, 2018, 44(5): 5636-5645.
- [12] Pham D T, Dimov S S, Petkov P V. Laser milling of ceramic components [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(3/4): 618-626.
- [13] Umer U, Mohammed M K, Al-Ahmari A. Multi-response optimization of machining parameters in micro milling of alumina ceramics using Nd : YAG laser [J]. Measurement, 2017, 95: 181-192.
- [14] Kibria G, Doloi B, Bhattacharyya B. Investigation into the effect of overlap factors and process parameters on surface roughness and machined depth during micro-turning process with Nd : YAG laser [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 60: 90-98.
- [15] Campanelli S L, Casalino G, Contuzzi N. Multi-objective optimization of laser milling of 5754 aluminum alloy [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 52: 48-56.
- [16] Yuan G F, Zeng X Y. Experimental study of laser milling on Al_2O_3 ceramics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(5): 467-470.
袁根福, 曾晓雁. Al_2O_3 陶瓷激光铣削试验研究 [J]. 中国激光, 2003, 30(5): 467-470.
- [17] Zhou J Z, She J, Huang S, *et al.* Research of aluminum/steel dissimilar metal laser welding-brazing and parameter optimization based on RSM [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(s1): s103004.
周建忠, 余杰, 黄舒, 等. 基于 RSM 的铝/钢异种金属激光熔钎焊工艺研究与参数优化 [J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s103004.
- [18] Liu Y, Zhang J, Pang Z C, *et al.* Investigation into the influence of laser energy input on selective laser melted thin-walled parts by response surface method [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 103: 34-45.
- [19] Chu Z T, Yu Z S, Zhang P L, *et al.* Weld profile prediction and process parameters optimization of T-joints of laser full penetration welding via response surface methodology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0203006.
褚振涛, 于治水, 张培磊, 等. 基于响应面分析的 T 型接头激光深熔焊缝形貌预测及工艺参数优化 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203006.
- [20] Senthilkumar B, Kannan T. Sensitivity analysis of flux cored arc welding process variables in super

- duplex stainless steel claddings [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 64: 1030-1039.
- [21] Cheng Q, Zhao H W, Zhang G J, *et al.* An analytical approach for crucial geometric errors identification of multi-axis machine tool based on global sensitivity analysis [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75: 107-121.
- [22] Tian X J, Liu Y H, Deng W, *et al.* Sensitivity analysis for process parameters influencing electric arc cutting [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78: 481-492.
- [23] Huang J, Chen Z B, Liu Q M, *et al.* Multi-objective optimization for laser closure process parameters *in vitro* skin tissue based on NSGA-II [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0207001.
- 黄俊, 陈子博, 刘其蒙, 等. 基于 NSGA-II 的离体皮肤组织激光融合工艺参数的多目标优化[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0207001.