

Orthogonal Experimental Study on Static Solution Assisted Laser Polishing of Stainless Steel

Mingyu Wang, Shufeng Sun*, Haitao Wang, Qingyu Liu, Huafeng Zhang, Yongwu Wang, Jin Wang

School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong
Email: *shufeng2001@163.com, 798090113@qq.com

Received: Jan. 8th, 2019; accepted: Jan. 24th, 2019; published: Jan. 31st, 2019

Abstract

In the process of static solution assisted laser polishing, laser processing parameters have great influence on the polishing effect. Optical fiber pulse laser (the wavelength is 1064 nm, pulse width of 100 ns) was used to polishing the surface of Custom 455 stainless steel. The parameters affecting the polishing effect included average power, scanning interval and scanning speed. The experiment scheme was designed with four parameters of scanning times, and the surface roughness and morphology of the samples after polishing were compared. The results of variance analysis by Minitab show that the original surface roughness will affect the polishing effect. Process parameters with the best polishing effect: scanning speed 11 mm/s, 6 times, average power 12 W, scanning interval 0.1 mm. The roughness can be reduced by 80% under this process parameter, and better polishing effect can be obtained.

Keywords

Laser Technique, Static Solution, Optical Fiber Nanosecond Pulse Laser, Taguchi Orthogonal Experiment, Surface Polishing

静态溶液辅助激光抛光不锈钢的正交实验研究

王铭禹, 孙树峰*, 王海涛, 刘庆玉, 张华峰, 王永武, 王 津

青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛
Email: *shufeng2001@163.com, 798090113@qq.com

收稿日期: 2019年1月8日; 录用日期: 2019年1月24日; 发布日期: 2019年1月31日

*通讯作者。

文章引用: 王铭禹, 孙树峰, 王海涛, 刘庆玉, 张华峰, 王永武, 王津. 静态溶液辅助激光抛光不锈钢的正交实验研究[J]. 机械工程与技术, 2019, 8(1): 30-38. DOI: 10.12677/met.2019.81005

摘要

静态溶液辅助激光抛光过程中,激光加工工艺参数对抛光效果有很大影响。采用光纤脉冲激光器(波长为1064 nm,脉冲宽度为100 ns)对Custom 455不锈钢表面进行抛光实验研究,用田口正交实验的方法,对影响抛光效果的参数包括平均功率、扫描间隔、扫描速度、扫描次数4个参数设计实验方案,并对抛光后试件表面粗糙度变化及形貌进行比较。通过Minitab进行方差分析,结果发现原始表面粗糙度会影响抛光效果,且存在最佳抛光效果的工艺参数:扫描速度为11 mm/s,扫描次数为6次,平均功率为12 W,扫描间隔为0.1 mm。在此工艺参数下可使粗糙度下降80%,得到更好的抛光效果。

关键词

激光技术, 静态溶液, 光纤纳秒脉冲激光, 田口正交实验法, 表面抛光

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

激光抛光作为一种非接触加工的新型加工技术,有传统抛光技术无法比拟的优点,近年来被广泛的应用于航空、医疗等领域。随着激光技术的发展,很多研究学者对激光复合抛光进行了研究,主要针对不同类型激光器与化学液、电化学、超声等方法的加工进行分析[1]。

自20世纪90年代以来国内外许多专家学者已经对金刚石薄膜、高分子聚合、陶瓷、半导体、光学元件等材料进行了大量抛光实验研究[2]。Ranoz [3]等采用Nd:YAG激光和CO₂激光将金属表面粗糙度Ra由7.0 μm~9.0 μm降到1.4 μm~2.1 μm。Temmler [4]等考察了连续激光和脉冲激光扫描速度和功率对粗糙度减少量的影响,使粗糙度降低了60%左右。经国内外实验研究发现,在空气中,采用脉冲宽度较小的激光器抛光金属材料时可得到较低的粗糙度和较好的表面质量,但使用红外激光器抛光对材料的热作用更明显,只能用于粗抛光[5]。研究表明,采用静态溶液辅助激光抛光的方法可以减少红外激光器抛光时的热作用,在激光抛光中辅以化学液的化学效应和冷却效应,可以达到更好的抛光效果。因此,本文提出了静态溶液辅助激光抛光医用不锈钢的实验研究,进一步探索不同影响因素对其抛光效果的影响规律,从而对参数进行优化,进一步提高抛光效果。

抛光效果主要以抛光后材料的表面质量作为重要的评判指标,因此,选择抛光的工艺参数非常重要。实验采用日本统计学专家田口玄一(Genichi Taguchi)创立了基于正交实验的“田口方法(Taguchi methods)”,通过较少的实验量进行完整的参数研究,引入信噪比(signal to noise ratio,简称为S/N)降低不可控制因素对实验的影响[6][7]。该方法近年来在航空、环境、矿业、机械工程等领域得到广泛应用[8]。

本文利用田口正交实验法设计实验方案,通过对实验结果进行分析,研究影响静态溶液辅助激光抛光抛光效果的主要因素,并对实验结果进行优化。

2. 光纤脉冲激光不锈钢表面作用

静态溶液辅助激光抛光是利用脉冲激光聚焦到溶液中的金属表面,在金属与溶液的交界面产生热-力学效应使材料表面发生变形,同时结合溶液的冷却和热化学作用,使金属表面平整。

2.1. 热效应和力效应分析

当高能量、短脉冲激光透过溶液后聚焦到金属表面时, 溶液与金属的交界面上, 激光被吸收的功率密度分别造成了金属材料 and 溶液的升温, 应该包括金属和溶液两个方面, 即:

$$I = I_m + I_l \quad (1)$$

其中: I_m 为金属材料吸收的激光功率密度部分, I_l 为溶液吸收的激光功率密度部分[9]。

对于激光照射溶液与材料界面温度分布可认为: 1) 由于纳秒脉冲激光的热渗透深度很小, 激光光斑中心处的热传导遵循一维模型; 2) 波长在红外波段的激光在溶液中的传输衰减主要以吸收为主($\lambda = 1064$ nm), 在分析纯试剂配置的溶液中溶液浓度对激光衰减影响微弱, 衰减特性与纯水相当[10]。由于覆盖在材料表面的溶液厚度只有 3 mm, 可忽略溶液对激光吸收的能量损失。3) 固液交界面处溶液和金属的温度相同[11]。

由于激光能量在空间上为高斯分布, 时间上为矩形脉冲, 因此激光辐照部位的温度为:

$$0 \leq t \leq t_{on} T(z, t) = \frac{2AI_m \sqrt{\beta_m}}{\lambda_m} \left[\sqrt{t} \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4\beta_m t}} - \sqrt{t-t_{on}} \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4\beta_m (t-t_{on})}} \right] \quad (2)$$

$$t > t_{on} T(0, t) = \frac{2AI_m \sqrt{\beta_m}}{\lambda_m} \left[\sqrt{t} - \sqrt{t-t_{on}} \right] \quad (3)$$

其中: t_{on} 为激光脉冲宽度脉冲; A 为材料表面吸收率; λ_m 为金属的热导率[12]。

根据上式可得到金属表面温度随时间的变化规律, 其温度在激光辐照的纳秒脉冲内急剧升温, 当脉冲能量结束后又快速下降, 到几百度后下降速度逐渐变慢。由于激光的高能量密度、高升温率的作用特点(其热流密度高达 MW/m^2 量级, 温度变化 10^7 K/s 以上), 导致近金属表面的溶液温度过热, 瞬间产生气泡并沸腾, 又称快速瞬态核化沸腾[11]。

激光透过溶液在聚焦区域内生成等离子体, 由于液体的不可压缩性, 在溶液与金属界面上膨胀的等离子体受到液体的限制, 对金属表现出明显的冲击波力学效应, 对金属表面材料进行去除。

2.2. 溶液化学效应分析

试件浸在较低浓度的 H_2SO_4 溶液中, 当激光透过化学液聚焦到试件表面时, 激光照射的光斑区域钝化膜被去除, 露出基体部分在光化学和热化学作用下发生反应, 而其他没有被激光照射的区域则在钝化膜的作用下不会发生化学反应。

3. 实验条件及实验方法

实验主要从激光器参数对加工后效果进行评估, 将抛光后试件表面粗糙度作为实验指标。本文采用型号 DSX-510 Olympus 显微镜对试件表面形貌进行观察, 并测量表面粗糙度, 基于 Origin、Minitab 等软件对数据进行处理, 分析影响抛光效果的主要因素及其影响规律。

3.1. 实验条件

实验中采用卡本特公司生产的 Custom455 不锈钢, 该材料为马氏体时效硬化不锈钢, 由于其有较高的强度和耐腐蚀性, 常被用于医疗、船舶、航天等方面, 材料化学成分如表 1 所示。相较于陶瓷材料, 不锈钢导热性好, 熔点高, 其热物理性能参数如表 2 所示。

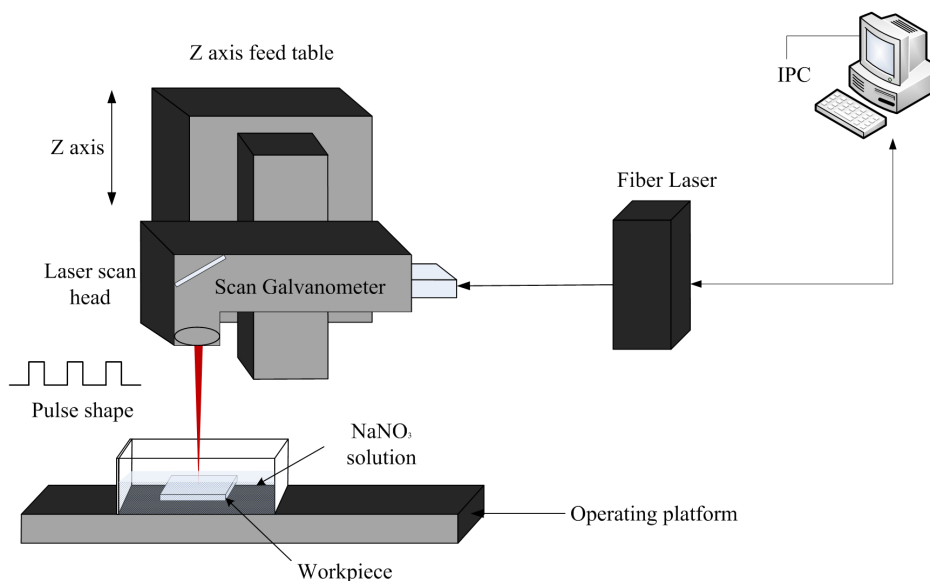
Table 1. Chemical composition of stainless steel custom 455 (wt%)**表 1.** Custom 455 不锈钢化学成分(质量分数, %)

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Cu	Mo	Ti	Nb	Fe
≤0.05	≤0.50	≤0.50	11.0~12.5	7.5~9.5	≤0.04	≤0.03	1.5~2.5	≤0.5	0.8~1.4	0.1~0.5	余下

Table 2. Thermal physical parameters of custom 455 stainless steel**表 2.** Custom 455 不锈钢热物理参数

密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	热导系数 $K/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热膨胀系数(10^{-6}K)	比热容($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
7.78	18~24.7	10.6~12	0.45

实验中采用的激光设备为 IPG 光纤激光器, 如图 1。激光通过扫描振镜、溶液将光斑聚焦到试件表面, 利用激光对材料的热作用进行加工。激光器脉宽为 100 ns, 波长为 1064 nm, 平均功率 200 W, 重复频率为 200 kHz。相较于传统的 Nd:YAG 激光器, 光纤激光器在功率改变时, 无论是平顶模式还是高斯模式, 光斑直径始终保持稳定如一。同时, 脉冲频率更高, 参数的实时调节性能也更强[13]。

**Figure 1.** Static solution assisted laser polishing experimental platform**图 1.** 静态溶液辅助激光抛光实验平台

实验具体参数设定如表 3 所示, H₂SO₄ 溶液浓度为 8%, 液面到材料表面高度 2 mm, 加工试件处于焦点位置, 抛光尺寸为 3.0 mm × 3.0 mm。

Table 3. Orthogonal experiments plan**表 3.** 正交实验方案

	参数	水平 1	水平 2	水平 3
A	扫描速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	5	8	11
B	扫描间隔 Δ/mm	0.02	0.06	0.10
C	平均功率 P/W	10	12	14
D	扫描次数 T	2	6	10

试件 I、试件 II 实验前表面用抛光机抛光，之后用激光器对试件表面粗加工，之后放入酒精中超声清洗 15 min、吹干，除去表面油污等杂质。图 2 所示激光粗加工后的试件表面形貌，图 2(a)为粗糙度 Ra 为 0.513 μm 时表面形貌，图 2(b)为粗糙度 Ra 为 1.832 μm 时表面形貌。

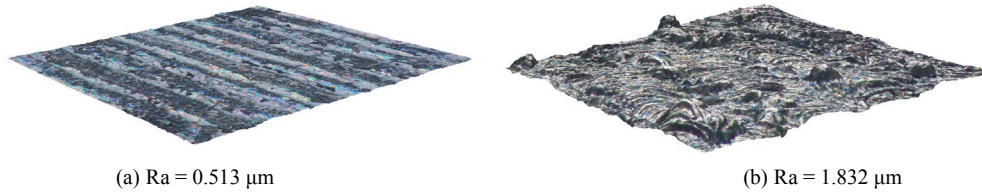


Figure 2. Surface topography of specimen after laser rough machining; (a) Ra = 0.513 μm , (b) Ra = 1.832 μm

图 2. 激光粗加工后试件表面形貌; (a) Ra = 0.513 μm , (b) Ra = 1.832 μm

3.2. 实验方法

对于确定的试件表面，影响抛光效果的因素有激光脉冲能量、扫描间隔以及扫描次数，影响脉冲能量的参数是平均功率、扫描速度、离焦量。在激光能量与脉冲宽度不变时，激光扫描速度和重复频率决定了材料表面单位面积单位时间平均吸收的光能，影响抛光效果[6]。当激光扫描速度低于 5 mm/s 时，激光对金属没有抛光作用，反而使金属表面粗糙度升高，表面烧灼作用明显。当扫描速度过高时，几乎没有抛光效果。激光的平均功率过低或过高时，激光和化学对金属材料的作用不明显或过分烧灼。

本实验采用田口正交试验的方法进行实验研究，设计 $L_9(3^4)$ 四因素三水平正交表，实验结果如表 4 所示。实验时未考虑各因素的交互作用。

Table 4. $L_9(3^4)$ Orthogonal experimental arrangements and results

表 4. $L_9(3^4)$ 正交实验安排和实验结果

序号	参数				Ra (μm)		ΔRa (μm)		信噪比	
	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Δ/mm	P/W	T	I	II	I	II	I	II
1	5	0.02	10	2	0.222	1.684	0.291	0.148	13.073	-4.526
2	5	0.06	12	6	0.287	1.655	0.226	0.177	10.842	-4.376
3	5	0.10	14	10	0.276	1.288	0.237	0.544	11.182	-2.198
4	8	0.02	12	10	0.261	1.439	0.252	0.393	11.667	-3.161
5	8	0.06	14	2	0.322	1.409	0.191	0.423	9.843	-2.978
6	8	0.10	10	6	0.315	1.766	0.198	0.066	10.033	-4.940
7	11	0.02	14	6	0.247	0.665	0.266	1.167	12.146	3.544
8	11	0.06	10	10	0.332	0.642	0.181	1.19	9.577	3.849
9	11	0.10	12	2	0.376	0.663	0.137	1.169	8.496	3.570

4. 结果与讨论

4.1. 信噪比与均值分析

信噪比(Signal-to-noise ratio)特征函数可分为望大特性、望小特性和望目特性。在本实验研究中，粗糙度越小，表面点蚀和熔渣越少，抛光效果越好，因此试验中采用望小特性，其信噪比为：

$$\eta = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4)$$

式中: n 为重复次数($n=3$); y_i 为实验的表面粗糙度。平均响应值的计算公式[14]为:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad (5)$$

用 Minitab 对表 4 实验结果进行分析处理, 抛光后表面粗糙度信噪比(S/N)与平均响应值见图 3, 当原始表面粗糙度低时(I), 扫描间距对表面粗糙度影响最明显; 当原始表面粗糙度高时(II), 扫描速度对表面粗糙度影响最明显。根据田口正交分析, 信噪比越高, 输出的性能评价指标越优。

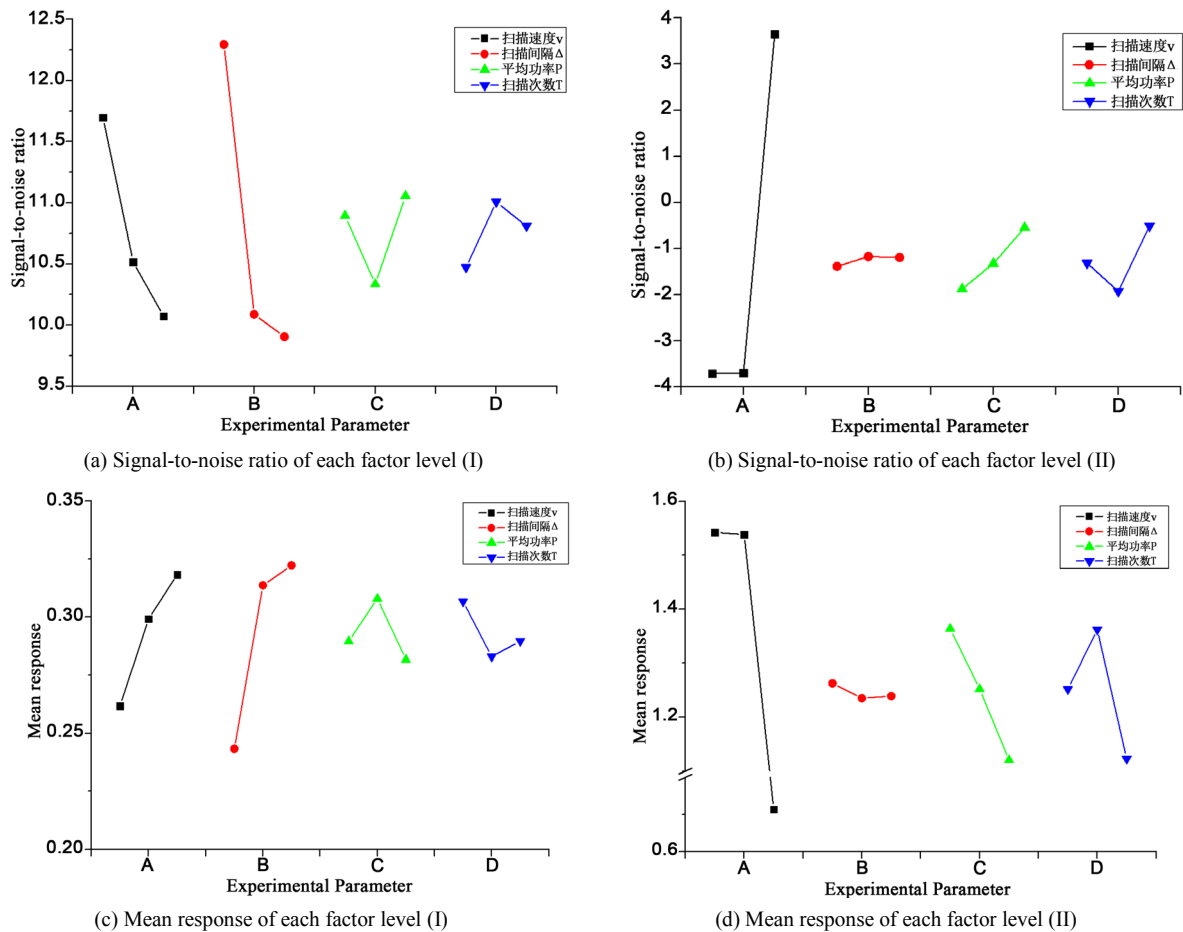


Figure 3. Signal-to-noise ratio and mean response of different original roughness; (a) Signal-to-noise ratio of each factor level (I), (b) Signal-to-noise ratio of each factor level (II), (c) Mean response of each factor level (I), (d) Mean response of each factor level (II)

图 3. 不同原始表面的粗糙度与均值响应; (a) 各因素水平信噪比(I), (b) 各因素水平信噪比(II), (c) 各因素水平均值响应(I), (d) 各因素水平均值响应(II)

利用直观分析法, 根据表 4 得出的信噪比和平均响应的分析法见表 5、表 6。对于试件 I, 初始表面粗糙度低为 $0.513 \mu\text{m}$, 静态溶液辅助激光对试件表面抛光只能降低 $0.2 \mu\text{m}$ 左右, 对实验结果影响的主次顺序为扫描间隔 > 扫描速度 > 平均功率 > 扫描次数, 各水平的最佳组合为 $B_1A_1C_3D_2$; 对于试件 II 抛光后表面粗糙度最高降低 70%左右, 对实验结果影响的主次顺序为扫描速度 > 扫描次数 > 平均功率 > 扫描间隔, 各水平的最佳组合为 $A_3D_3C_3B_2$ 。

Table 5. Signal-to-noise ratio and mean response (I)
表 5. 信噪比与均值响应(I)

水平	信噪比				平均响应			
	$v/(mm \cdot s^{-1})$	Δ/mm	P/W	T	$v/(mm \cdot s^{-1})$	Δ/mm	P/W	T
1	11.699	12.295	10.895	10.471	0.2617	0.2433	0.2897	0.3067
2	10.515	10.087	10.335	11.007	0.2993	0.3137	0.3080	0.2830
3	10.073	9.010	11.057	10.809	0.3183	0.3223	0.2817	0.2897
Δ	1.626	2.391	0.722	0.537	0.0567	0.0790	0.0236	0.0237
排序	2	1	3	4				

Table 6. Signal-to-noise ratio and mean response (II)
表 6. 信噪比与均值响应(II)

水平	信噪比				平均响应			
	$v/(mm \cdot s^{-1})$	Δ/mm	P/W	T	$v/(mm \cdot s^{-1})$	Δ/mm	P/W	T
1	-3.7004	-1.3815	-1.8725	-1.3118	1.5423	1.2627	1.3640	1.2520
2	-3.6931	-1.1683	-1.3225	-1.9241	1.5380	1.2353	1.2523	1.3620
3	3.6542	-1.1895	-0.5443	-0.5034	0.6567	1.2390	1.1207	1.1230
Δ	7.3546	0.2132	1.3281	1.4207	0.8857	0.0273	0.2433	0.2390
排序	1	4	3	2				

4.2. 方差分析

根据直观分析法得出最优加工参数，但是无法分析导致实验结果存在差异的原因。由于实验重复次数低，用 Minitab 方差分析实验结果时将影响最小的因素作为误差项，试件 I、II 方差分析结果见表 7、表 8。在显著性水平为 0.1 时，P 的值小于 0.1 时，扫描间隔对响应有显著影响，如表 7，分析其原因可知，当能量过大；在显著性水平为 0.01 时，P 的值小于 0.01 时，扫描速度对响应有显著影响，如表 8。分析其变化原因可知，当抛光速度较小或扫描间隔过小时，激光扫描线重叠率过高，能量累积严重，对不锈钢表面造成烧蚀严重；而当扫描速度过大或扫描间隔过大时，激光能量累积不足，反而使抛光效果降低。

Table 7. Variance analysis table of surface roughness (I)
表 7. 表面粗糙度方差分析表(I)

	自由度	方差 SS ($\times 10^{-3}$)	均方差 MS ($\times 10^{-3}$)	F	P	Sig.
A	2	4.9909	2.4954	5.59	0.152	-
B	2	11.2629	5.6314	12.60	0.074	√
C	2	1.0936	0.5468	1.22	0.450	-
误差	2	0.8936	0.4468			
总计	8	18.2409				

Table 8. Variance analysis table of surface roughness (II)
表 8. 表面粗糙度方差分析表(II)

	自由度	方差 SS ($\times 10^{-3}$)	均方差 MS ($\times 10^{-3}$)	F	P	Sig.
A	2	1.5612	0.7806	1182.11	0.001	√
C	2	0.0890	0.0445	67.40	0.015	-
D	2	0.0859	0.0429	65.01	0.015	-
误差	2	0.0013	0.0007			
总计	8	1.7374				

4.3. 最优参数的预测与验证

根据对信噪比和均值响应分析, 当原始表面粗糙度低时, 抛光只能降低。对于试件 II,

$$\eta = \bar{\eta} + (\bar{\eta}_{A3} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{B2} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{C3} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{D3} - \bar{\eta}) = \bar{\eta}_{A3} + \bar{\eta}_{B2} + \bar{\eta}_{C3} + \bar{\eta}_{D3} - 2\bar{\eta} \quad (6)$$

其中, η ——最优条件下的信噪比; $\bar{\eta}_{A3}$ ——A 因素 3 水平下的信噪比; $\bar{\eta}_{B2}$ ——B 因素 3 水平下的信噪比; $\bar{\eta}_{C3}$ ——C 因素 3 水平下的信噪比; $\bar{\eta}_{D3}$ ——D 因素 3 水平下的信噪比; $\bar{\eta}$ ——测得的 9 组信噪比的数据均值[13]。

通过计算最终求得: $\eta = 3.6542 - 1.1683 - 0.5443 - 0.5034 + 2 \times 1.6619 = 4.762$ 。

根据望小特性, 计算公式(6)预测最优条件下的粗糙度为 $0.578 \mu\text{m}$ 。通过实验验证, 不锈钢原始表面粗糙度为 $1.832 \mu\text{m}$, 在 $A_3B_2C_3D_3$ 条件下测得 $0.510 \mu\text{m}$ 。最优条件下抛光前后表面形貌见图 4。

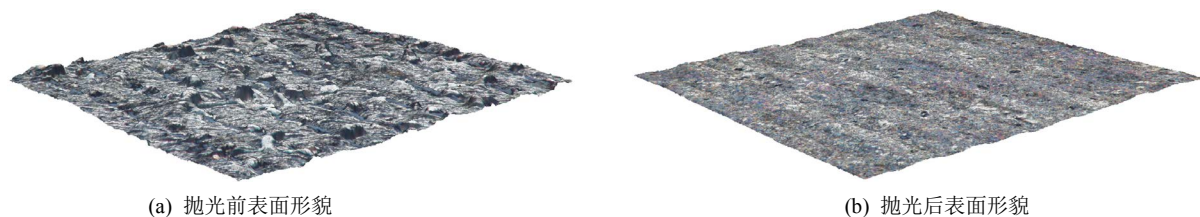


Figure 4. Surface topography before and after polishing under the optimal conditions
图 4. 最优条件下抛光前后表面形貌图

5. 结论

- 1) 静态溶液辅助激光抛光效果与原始表面形貌有关, 当原始表面粗糙度低时, 实验参数对抛光效果影响不大; 当原始表面粗糙度高时, 抛光效果明显;
- 2) 原始表面粗糙度高时, 通过对信噪比响应和方差分析, 得出扫描速度对表面粗糙度影响最大, 其次是扫描次数、平均功率和扫描间隔;
- 3) 当扫描速度为 11 mm/s , 扫描次数为 6 次, 平均功率为 12 W , 扫描间隔为 0.1 mm 时, 可使表面粗糙度降到 $0.51 \mu\text{m}$, 得到更好加工效果。

参考文献

- [1] 黄加福, 魏昕, 谢小柱. 影响激光抛光效果的因素分析[J]. 激光与光电子学进展, 2008(12): 20-24.
- [2] 张峰烈. 金属材料纳秒紫外脉冲激光微抛光理论与技术的研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2011: 1-3.
- [3] Ramos, J.A., Murphy, J., Wood, K., et al. (2002) Surface Roughness Enhancement of Indirect-SLS Metal Parts by Laser Surface Polishing.

- [4] Temmler, A., Willenborg, E. and Wissenbach, K. (2012) Laser Polishing. *International Society for Optics and Photonics*, 82430W-82430W-13.
- [5] 戴伟, 郑志镇, 李建军, 等. 金属材料表面的激光抛光研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 7-20.
- [6] Taguchi, G. (1989) Introduction to Quality Engineering. *Technometrics*, **31**, 255-256.
- [7] Jeyapaul, R., Shahabudeen, P. and Krishnaiah, K. (2005) Quality Management Research by Considering Multi-Response Problems in the Taguchi Method—A Review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **26**, 1331-1337. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2102-y>
- [8] 张风宝, 杨明义, 李占斌. 微小区土壤侵蚀试验中田口方法代替全因子设计的可行性分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 1-9.
- [9] Vogel, A., Noack, J., Nahen, K., *et al.* (1999) Energy Balance of Optical Breakdown in Water at Nanosecond to Femtosecond Time Scales. *Applied Physics B*, **68**, 271-280. <https://doi.org/10.1007/s003400050617>
- [10] 张华, 徐家文, 王吉明. 中性盐溶液辅助激光加工试验研究[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1836-1840.
- [11] 张朝阳, 陈飞, 王耀民, 等. 纳秒脉冲激光对水下靶材的掩模微细刻蚀加工[J]. *纳米技术与精密工程*, 2011, 9(2): 180-184.
- [12] Ueno, I. and Shoji, M. (2001) Thermal-Fluid Phenomena Induced by Nanosecond-Pulse Heating of Materials in Water. *Journal of Heat Transfer*, **123**, 1123-1132. <https://doi.org/10.1115/1.1409264>
- [13] Bill Shiner. IPG 光纤激光器在航空领域的钻孔应用[J]. *金属加工: 冷加工*, 2017(22): 16-18.
- [14] 刘永姜, 李智航, 王洋, 等. 基于田口方法的车削 45 钢参数优化分析[J]. *机械设计与制造*, 2018(3): 95-97.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-6631, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: met@hanspub.org