

## 304 不锈钢激光抛光的参数优化及抛光层性能分析

李道齐, 王涛\*, 杨紫璠, 李宇彬, 王书文

河北工业大学机械工程学院, 天津 300401

**摘要** 将光纤脉冲激光器的激光功率、重复频率、离焦量和扫描速度作为影响因素,以 AISI304 不锈钢的表面粗糙度作为评价指标,设计了激光抛光的正交试验,通过极差分析得到最佳工艺参数组合,在此参数组合下快速将表面粗糙度降低约 67%。使用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、电化学工作站等研究了激光抛光前、后的表面性能变化及机理。结果表明:激光抛光后,试样表面硬度降低了约 15%,自腐蚀电流密度提高了  $10.978 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。抛光层内 C、Cr 元素含量(质量分数)分别降低了约 2.4% 和 3.2%,平均晶粒尺寸减小了约  $0.37 \mu\text{m}$ ,抛光表面的残余应力约为  $139.6 \text{ MPa}$ 。分析得出,随着 C 元素含量的减少,试样表面浅层金属发生软化,从而表面显微硬度降低;Cr 元素含量的减少弱化了不锈钢的钝化能力,同时晶粒细化与残余拉应力的存在为腐蚀性  $\text{Cl}^-$  提供了快速扩散路径,使得试样自腐蚀电流密度明显提高。

**关键词** 激光技术; 激光抛光; 304 不锈钢; 正交试验; 参数优化; 性能分析

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220735

## 1 引言

激光抛光是一种新型激光表面处理技术,具有无污染、可控性高及非接触式等优点<sup>[1-3]</sup>。在针对金属进行表面处理的过程中,激光抛光技术能够在降低材料表面粗糙度的同时,对材料表面进行优化处理,满足其应用性与装饰性的要求。

近年来,国内外学者针对激光抛光金属的工艺参数进行了大量的试验研究。Hua 等<sup>[4]</sup>研究了激光扫描速度对抛光效果的影响,结果显示,当扫描速度为  $2.5 \text{ mm/s}$  时,DF-2 冷作工具钢的表面粗糙度降至最低;当扫描速度为  $1 \text{ mm/s}$  时,表面粗糙度反而增加了  $0.92 \mu\text{m}$ 。那冉等<sup>[5]</sup>分析了激光器的激光电压、脉宽等对 38CrMoAl 合金钢表面粗糙度的影响规律,通过单因素试验优选出工艺参数组合,在此参数组合下将表面粗糙度降低了  $62.92 \text{ nm}$ 。此外,激光抛光工件的表面形貌是在传热和流体力学的相互作用中形成的,因此在激光抛光过程中,激光束对抛光区材料性能的影响也是不可忽略的。Temmler 等<sup>[6]</sup>发现,在  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2$  氛围下,H11 模具钢经激光器抛光后,表面不仅产生了高达  $926 \text{ MPa}$  的残余拉应力,而且还出现了脱碳现象。廖聪豪等<sup>[7]</sup>采用连续激光对钛合金表面进行了抛光试验,通过分析得出,晶粒的细化(尺寸约为  $0.45 \mu\text{m}$ )与表面残余拉应力(约为  $139 \text{ MPa}$ )的存在是试样自腐蚀电流密度提高了  $5.48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  的主要原因。Zhou

等<sup>[8]</sup>认为,Ti6Al4V 钛合金经连续波激光抛光后,表面形成了具有高位错密度的马氏体相及大量的相界,试样显微硬度提高了约 25%;而抛光表面自腐蚀电流密度的降低与表面粗糙度的降低和抛光层晶粒尺寸的增大有关。由上述研究可以发现,在激光抛光工艺参数研究方面,以往的研究仅分析了单个工艺参数对金属材料表面粗糙度的影响,并未考虑各工艺参数间的交互作用;在抛光层性能研究方面,虽已有研究涉及,但与脉冲激光抛光过程相关的性能变化还没有被完全了解,且尚未有文献从元素含量变化趋势上对抛光层性能进行机理分析<sup>[9-10]</sup>。

鉴于此,本文一方面采用光纤脉冲激光器对 AISI304 不锈钢进行激光抛光的正交试验,通过极差分析得到了最优工艺参数组合。另一方面对激光抛光前、后的表面进行了性能测试,从晶粒大小、残余应力特别是元素含量变化趋势上对抛光层性能进行了机理分析。本文研究成果为未来采用光纤脉冲激光器提升金属表面质量与性能提供了新的思路。

## 2 试验准备

## 2.1 激光抛光的工艺原理

如图 1 所示,脉冲激光抛光是利用激光辐照材料,使其微观表面的波峰受热发生熔融,较高处熔化的材料在表面张力和自身重力的作用下向周围流动,填补表面凹陷,从而达到降低表面粗糙度的目的<sup>[11]</sup>。

收稿日期: 2022-04-07; 修回日期: 2022-05-26; 录用日期: 2022-07-12; 网络首发日期: 2022-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(51775166)

通信作者: \*wtao\_1@163.com

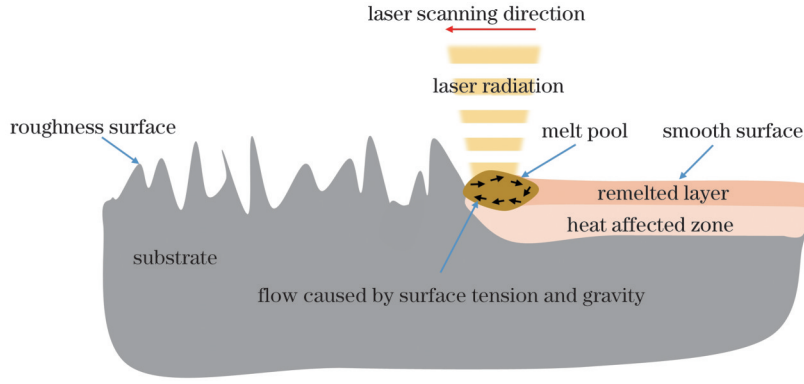


图 1 脉冲激光抛光原理图

Fig. 1 Schematic of pulse laser polishing

激光抛光时,具有极高能量密度的激光几乎可以熔化甚至汽化任何材料<sup>[12]</sup>。一旦工艺参数设置不合理,就会导致光斑内的平均能量密度过低或过高。当能量密度过低时,材料微观表面的波峰无法被熔融,从而起不到抛光作用;当能量密度过高时,深层材料熔化甚至沸腾,反而使表面粗糙度增加。因此必须合理设置脉冲激光器的工艺参数,严格控制单个光斑内的平均能量密度以实现理想的抛光效果。具体而言,脉冲激光单个光斑内的平均能量密度<sup>[13]</sup>可表示为

$$E = \frac{4P}{f\pi d^2}, \quad (1)$$

式中: $E$ 为单个激光光斑内的平均能量密度; $P$ 为激光功率; $f$ 为重复频率; $d$ 为光斑直径。通常激光光斑内的能量密度分布呈高斯形,如图 2(a)所示,当光斑位于焦平面时,能量密度分布<sup>[14]</sup>可表示为

$$\phi(r) = \frac{8\delta_0}{\pi d^2} \exp\left(-\frac{8r^2}{d^2}\right), \quad (2)$$

式中: $r$ 为分布点到光斑中心的距离; $\delta_0$ 为激光器输出的激光脉冲能量。

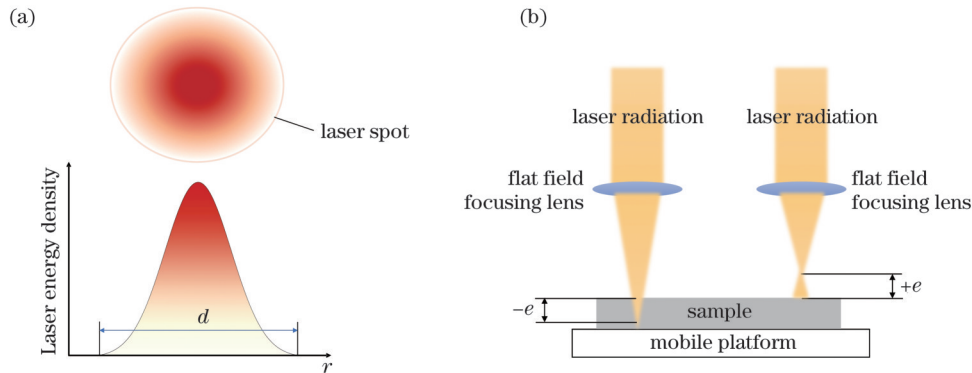


图 2 激光光斑内的能量密度分布与离焦量示意图。(a)光斑内能量密度分布图;(b)离焦量示意图

Fig. 2 Schematics of energy density distribution in laser spot and defocus distance. (a) Energy density distribution in laser spot; (b) schematic of defocus distance

在激光抛光过程中,离焦量也是影响抛光效果的重要因素。如图 2(b)所示,当激光束通过物镜聚焦于材料待抛光表面上方时,称为正离焦,用 $+e$ 表示;反之,称为负离焦,用 $-e$ 表示。当离焦量为负时,激光束聚焦所形成的热影响区会波及材料抛光表面内部的基体,导致基体产生高热梯度裂纹<sup>[15]</sup>。此外,离焦量的改变会使材料表面的光斑大小发生变化,进而影响光斑重叠率。在针对区域进行激光抛光时,光斑重叠率可以细分为沿着激光扫描路径的横向光斑重叠率及垂直于激光扫描路径的纵向光斑重叠率,二者<sup>[16-17]</sup>可表示为

$$\varphi_x = 1 - \frac{v}{f \cdot d} \times 100\%, \quad (3)$$

$$\varphi_y = \frac{d - \Delta}{d} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: $\varphi_x$ 是横向光斑重叠率; $\varphi_y$ 是纵向光斑重叠率; $v$ 是扫描速度; $\Delta$ 是填充线间距。

由上文叙述可知,光斑直径受到离焦量的影响。当离焦量大于物镜的焦深时,光斑直径 $d = (d_0 \cdot e) / \xi_0$ <sup>[14]</sup>,代入式(2)得,此时激光光斑内的能量密度分布<sup>[14]</sup>为

$$\phi(r, e) = \frac{8\delta_0 \xi_0^2}{\pi d_0^2 e^2} \exp\left(-\frac{8\xi_0^2 r^2}{d_0^2 e^2}\right), \quad (5)$$

式中: $d_0$ 为通过物镜之前激光光束的直径; $\xi_0$ 为物镜焦距。

## 2.2 激光抛光试验装置、材料及试验方法

激光抛光试验装置如图 3(a)所示,采用最大输出功率

率为 30 W、波长为 1064 nm、脉宽为 100~130 ns、频率范围为 30~80 kHz 的光纤脉冲激光器,焦平面处的光斑直径约为 50 μm。激光抛光试验材料选用尺寸为 50 mm×50 mm×3 mm 的 AISI304 不锈钢板,抛光前、后的表面性能检测使用线切割得到的尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm 的 AISI304 不锈钢块体,为了最大程度降低线切割造成的热影响,使用砂纸将截面磨除约 0.5 mm。在试

验过程中,调整激光功率、重复频率、离焦量和扫描速度这四个工艺参数,对 304 不锈钢表面进行抛光,抛光路线为图 3(b)所示的“弓”字形,抛光区面积为 10 mm×10 mm,填充线间距为 0.03 mm。在每个抛光区域内,采用探针式粗糙度仪,在两个相互垂直的方向上各测量两次,取算术平均值作为最终的表面粗糙度值( $R_a$ ),测得原始试样的表面粗糙度值  $R_a = 0.5724 \mu\text{m}$ 。

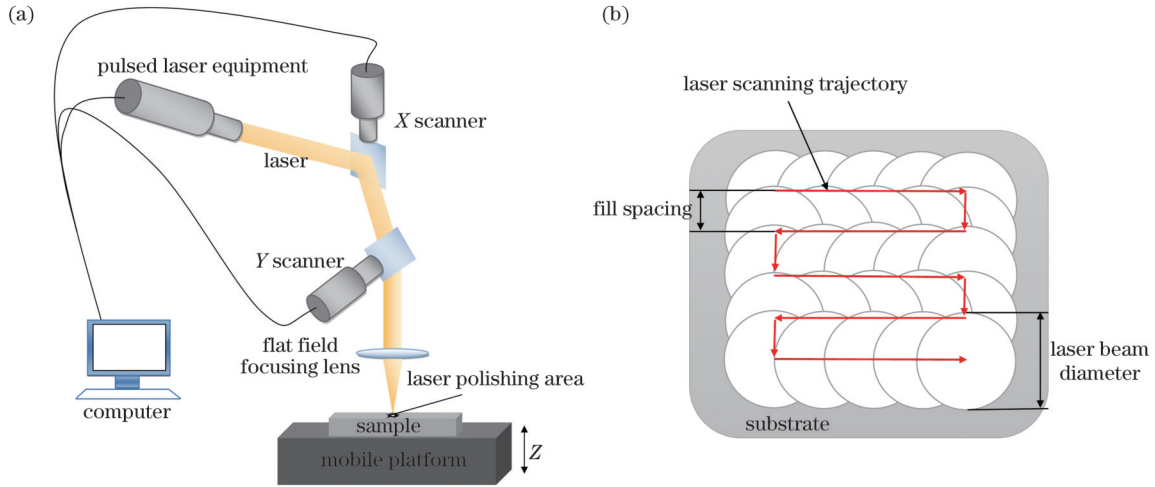


图 3 激光抛光试验装置与激光扫描路径示意图。(a)激光抛光试验装置;(b)激光扫描路径

Fig. 3 Schematics of laser polishing experimental device and laser scanning trajectory. (a) Laser polishing experimental device; (b) laser scanning trajectory

### 3 正交试验及参数优化

#### 3.1 正交试验设计与结果

基于大量的单因素试验结果,正交试验各组因素水平值如表 1 所示。

正交试验设计矩阵及试验结果如表 2 所示,其中  $R_{ax}$  为沿激光扫描路径方向测得的粗糙度值,  $R_{ay}$  为垂直于激光扫描路径方向测得的粗糙度值。为了更加方便地观测激光抛光前、后表面的粗糙度变化,将试验结果生成折线图,如图 4 所示。可以看出:4 号试样的表面粗糙度值最低,降低了约 56%;3 号试样的表面粗糙度值最高,仅降低了约 17%。

表 1 正交试验因素的水平值

Table 1 Level values of orthogonal experimental factors

Variable	Level 1	Level 2	Level 3
Laser power $P$ / W	9	10.5	12
Defocus distance $h$ / mm	2	3	4
Repetition frequency $f$ / kHz	60	70	80
Scanning speed $v$ / (mm·s <sup>-1</sup> )	1650	1700	1750

#### 3.2 试验极差分析

极差值  $R$  反映了因素对抛光效果的影响程度。极差值越大,该因素对抛光效果的影响也就越大。极差分析结果如表 3 所示,其中  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为各因素在 level

表 2 正交试验设计矩阵及结果

Table 2 Orthogonal experimental design matrix and results

No.	$P$ / W	$h$ / mm	$f$ / kHz	$v$ / (mm·s <sup>-1</sup> )	$R_{ax}$ / μm	$R_{ay}$ / μm	$R_a$ / μm
1	9.0	2	60	1650	0.3262	0.3156	0.3209
2	9.0	3	70	1700	0.4131	0.4093	0.4112
3	9.0	4	80	1750	0.4622	0.4824	0.4723
4	10.5	2	70	1750	0.2515	0.2497	0.2506
5	10.5	3	80	1650	0.3819	0.3871	0.3845
6	10.5	4	60	1700	0.4152	0.3874	0.4013
7	12.0	2	80	1700	0.2869	0.2655	0.2762
8	12.0	3	60	1750	0.3274	0.3360	0.3317
9	12.0	4	70	1650	0.3812	0.3578	0.3695

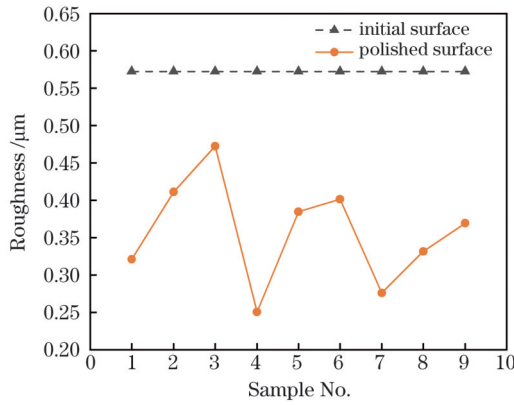


图4 激光抛光前、后的粗糙度

Fig. 4 Roughnesses before and after laser polishing

1、level 2、level 3 下试验结果的平均值。可以看出,抛光效果的优劣与离焦量  $h$  的关系最为密切。离焦量的

改变会使抛光表面的熔池直径发生变化,进而会对热耦合区域的大小产生影响。

表3 极差分析结果

Table 3 Range analysis results

Parameter	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$R$
$P/W$	0.4015	0.3455	0.3258	0.0757
$h/mm$	0.2826	0.3758	0.4144	0.1318
$f/kHz$	0.3513	0.3438	0.3777	0.0339
$\nu/(mm \cdot s^{-1})$	0.3583	0.3629	0.3515	0.0114

由图5可得,激光抛光最优工艺参数组合为激光功率  $P=12\text{ W}$ 、离焦量  $h=2\text{ mm}$ 、重复频率  $f=70\text{ kHz}$ 、扫描速度  $\nu=1750\text{ mm/s}$ 。在最优工艺参数组合下再次进行抛光试验,得到的粗糙度  $R_a=0.1903\text{ }\mu\text{m}$ , 相较参数优化前降低了约 67%。

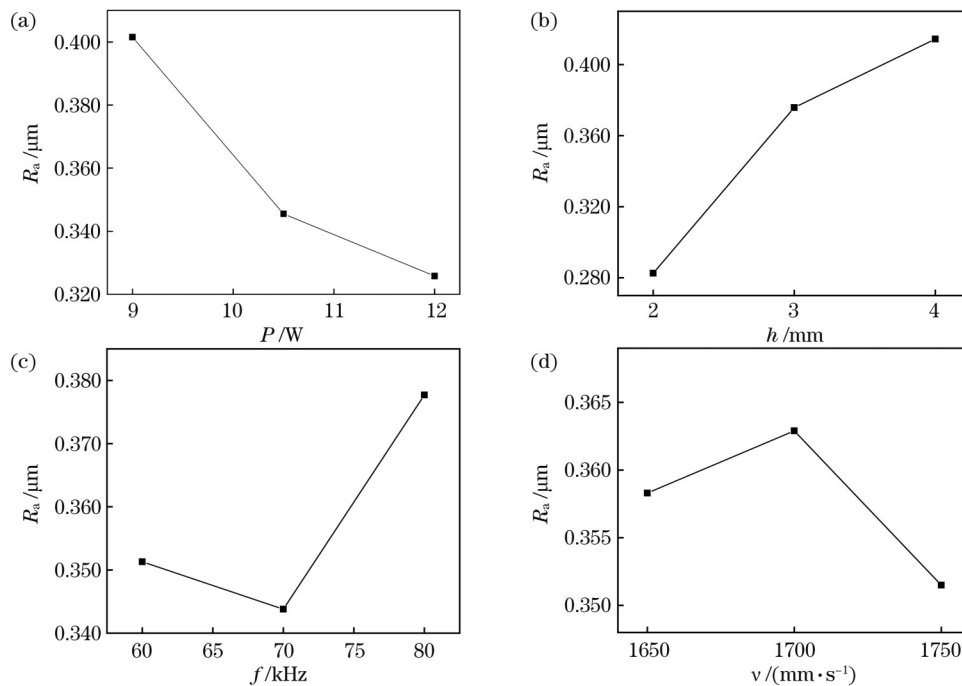


图5 不同参数的极差效应图。(a)激光功率;(b)离焦量;(c)重复频率;(d)扫描速度

Fig. 5 Range effect diagrams for different parameters. (a) Laser power; (b) defocus distance; (c) repetition frequency; (d) scanning speed

采用超景深显微镜将试样的原始表面与最优工艺参数下抛光所得的表面放大 1000 倍。由图6(a)可看出,原始表面山峰起伏、沟壑纵横;图6(b)显示,经过

激光抛光后,原始表面的沟壑已被熔融金属填平,仅存在少量凸起或凹陷。在图6中的划线部位截取  $x$ 、 $y$  向的表面轮廓,如图7所示。可以看出,原始表面的轮廓

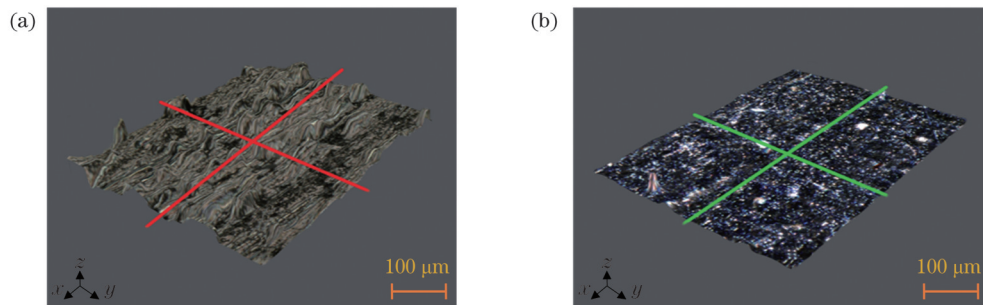


图6 表面三维形貌。(a)原始表面;(b)最优参数下抛光后的表面

Fig. 6 3D surface topographies. (a) Original surface; (b) polished surface under optimal parameters

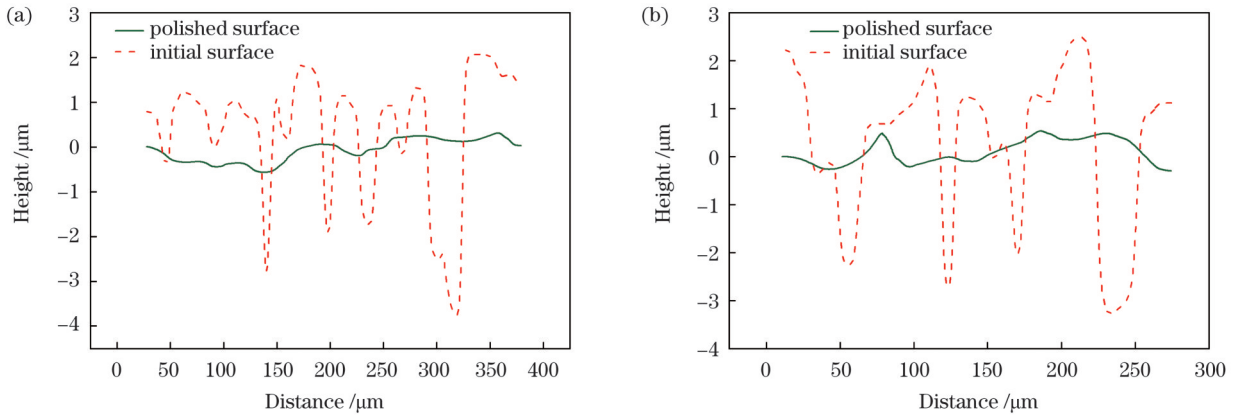


图 7 激光抛光前、后试样表面的轮廓。(a)沿  $x$  方向; (b)沿  $y$  方向

Fig. 7 Surface profiles of samples before and after laser polishing. (a) Along  $x$  direction; (b) along  $y$  direction

具有不规则的峰、谷形状,而抛光后的表面轮廓趋于平缓,是一条略有波动的轮廓曲线。

## 4 抛光层形貌与性能分析

### 4.1 抛光层形貌与元素分析

采用扫描电镜观测抛光前、后表面的微观形貌,如图 8、9 所示。从图 8(a)、(c)可以看出,原始表面充斥着无序的划痕与凹坑。图 9(a)、(c)显示,抛光后材料表面的缺陷得到修复,表面明显变得平滑。

对抛光前、后的试样 1 和试样 2 进行能谱仪 (EDX) 分析,为了提高结果的准确度,在分析前对仪

器进行了校准。结果如图 8(b)与图 9(b)、图 8(d)与图 9(d)所示,激光抛光后,抛光层中 Cr 元素的平均质量分数降低了约 3.2%。这主要是在激光抛光的过程中,钝化膜遭到破坏及高温促使的氧化反应所造成的。此外,抛光层内 C 元素平均质量分数的降低也较为明显,约为 2.4%,激光辐照使基体表面材料发生熔融,液态材料的扩散系数高于固态材料,碳元素通过扩散和对流到达熔体表面,与加工环境中的气体相互作用,并从材料中沉淀出来<sup>[6]</sup>。而且在高温环境中,相比于基体中的铁原子,碳原子与空气中的氧原子具有更强的结合能力,从而碳元素发生扩散现象。

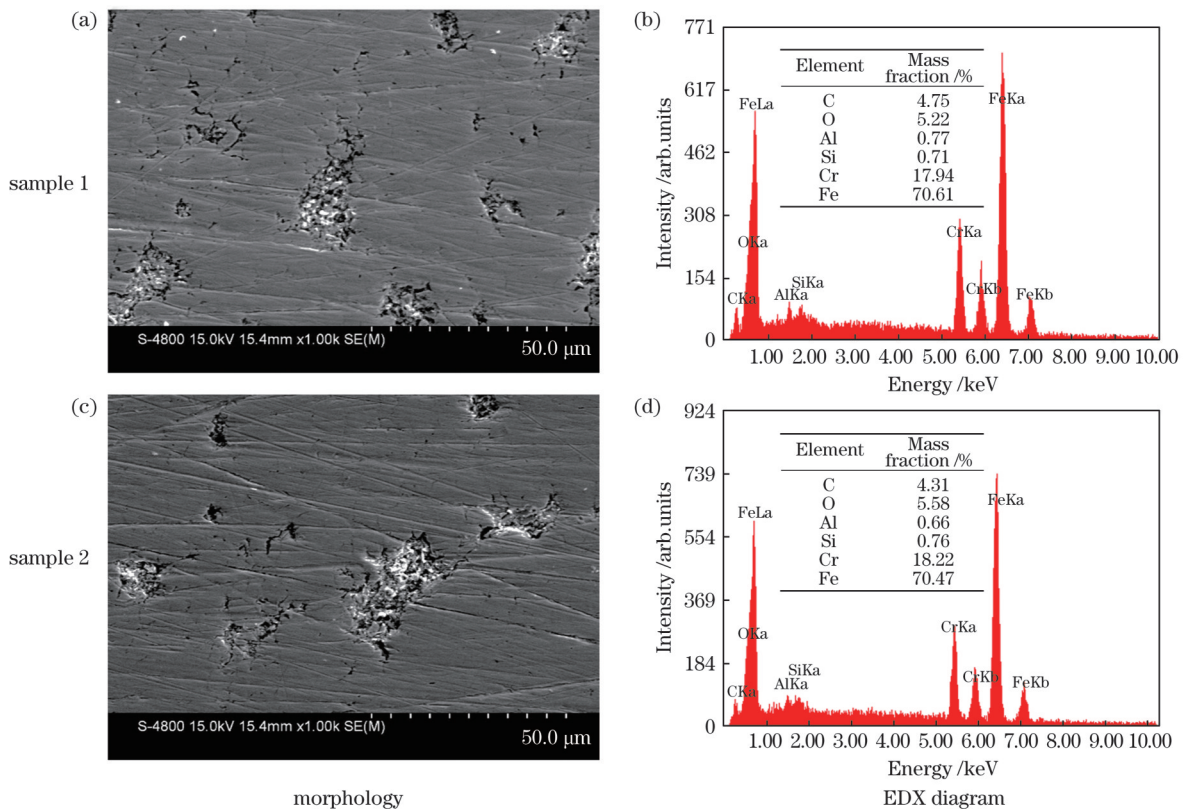


图 8 原始表面的微观形貌与 EDX 图

Fig. 8 Morphologies and EDX diagrams of original surfaces

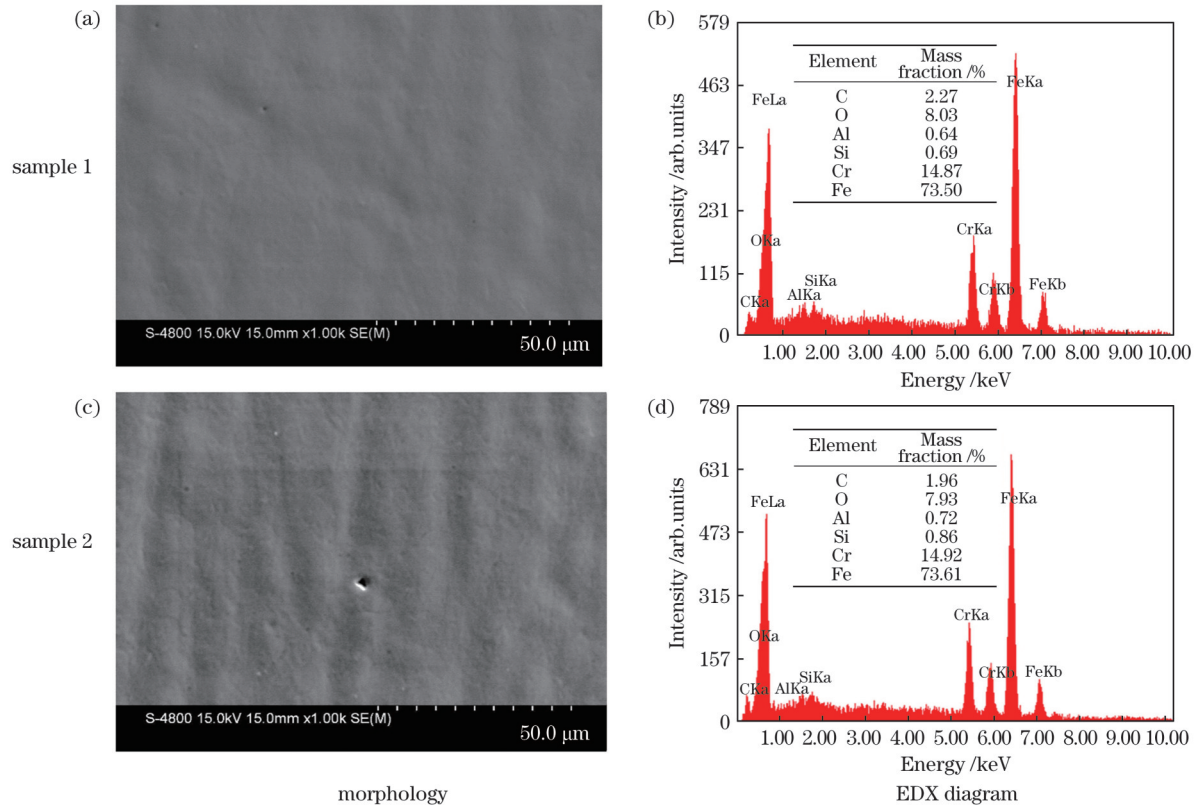


图 9 最优参数下抛光后表面的微观形貌与 EDX 能谱图

Fig. 9 Morphologies and EDX diagrams of polished surfaces under optimal parameters

### 4.2 抛光层物相分析

采用 X 射线衍射仪在  $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$  衍射角范围内对 304 不锈钢样品表面进行扫描,步长设置为  $4^{\circ}/\text{min}$ 。结果如图 10 所示,5 个  $\gamma$  衍射峰和 2 个  $\alpha$  衍射峰组成了原始试样的 X 射线衍射 (XRD) 图谱,其中  $\alpha$  的含量与材料的塑性形变量呈正相关。由于在切割、打磨等前处理过程中,材料容易产生形变,因此原始试样的 XRD 图谱中存在  $\alpha$  衍射峰。经过激光抛光后, $\alpha(211)$  衍射峰逐渐显现, $\alpha(110)$  衍射峰的强度超过了  $\gamma(111)$

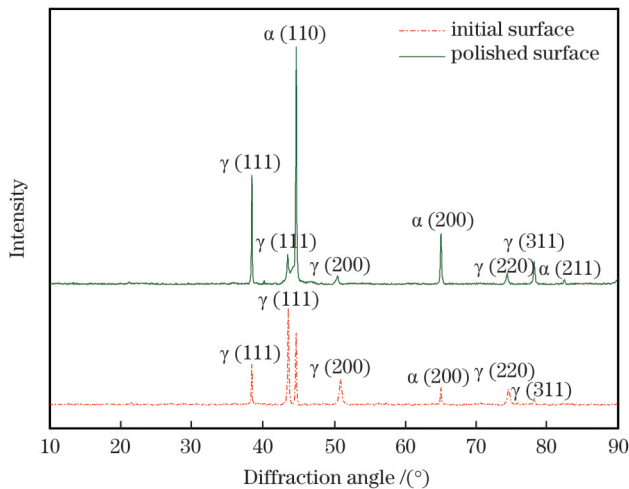


图 10 激光抛光前、后 304 不锈钢试样的 XRD 图谱

Fig. 10 XRD patterns of 304 stainless steel sample before and after laser polishing

衍射峰,成为抛光试样中的最强衍射峰,这表明激光抛光促使了  $\gamma$  向  $\alpha$  的转变。

对  $40^{\circ}\sim 76^{\circ}$  区域进行放大对比,如图 11 所示。激光抛光后,试样的衍射峰宽有所增大,这是由于抛光层内部组织在抛光过程中出现了孪晶、位错等晶体缺陷,因此晶粒细化;而衍射峰朝着低角度方向发生了不同程度的偏移,这说明抛光层内的晶格常数变大,存在着残余拉应力<sup>[7]</sup>。

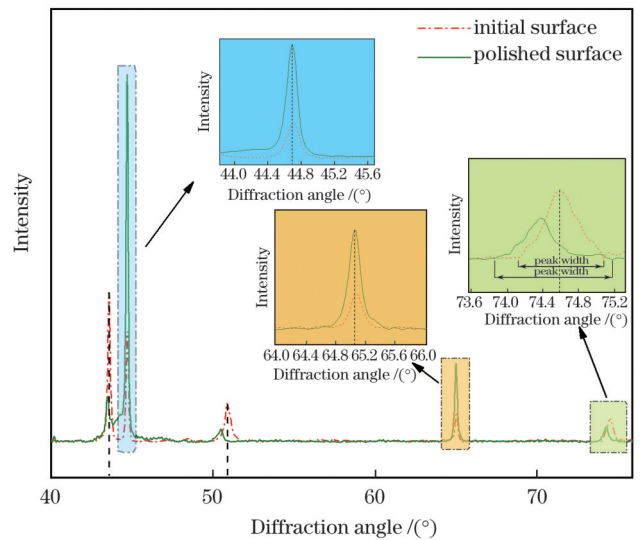


图 11 激光抛光前、后 304 不锈钢试样局部放大的 XRD 图谱

Fig. 11 Locally amplified XRD patterns of 304 stainless steel sample before and after laser polishing

### 4.3 抛光层晶粒尺寸及残余应力分析

采用金相系统对抛光前、后的表面晶粒变化进行观测,并用电子背散射衍射仪表征晶粒尺寸,结果如图 12、13 所示。原始表面的晶粒尺寸主要分布在 2.03~4.17  $\mu\text{m}$  范围内,平均晶粒尺寸约为 3.24  $\mu\text{m}$ ;抛光后,

试样表面晶界明显增多,晶粒尺寸主要分布在 1.79~3.64  $\mu\text{m}$  范围内,平均晶粒尺寸约为 2.87  $\mu\text{m}$ ,由此可见激光抛光造成了抛光层内晶粒尺寸的细化,这与 XRD 图谱的结论相符。

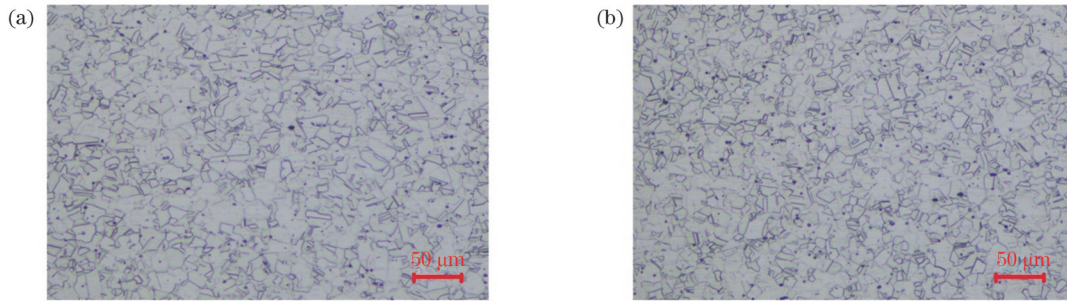


图 12 激光抛光前、后试样表面的晶粒图。(a)抛光前;(b)抛光后

Fig. 12 Grain plots of sample surface before and after laser polishing. (a) Initial surface; (b) polished surface

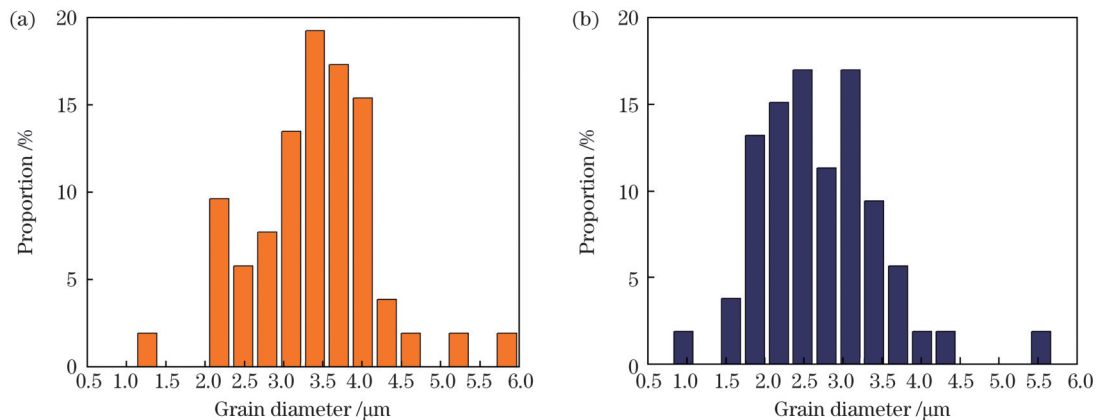


图 13 激光抛光前、后试样表面的晶粒尺寸。(a)抛光前;(b)抛光后

Fig. 13 Grain sizes of sample surface before and after laser polishing. (a) Initial surface; (b) polished surface

采用残余应力检测仪检测激光抛光前、后的表面残余应力,结果如表 4 所示,原始表面存在的平均残余应力约为  $(-118.5 \pm 72.0)$  MPa,激光抛光后表面的平均残余应力增大至  $(139.6 \pm 68.7)$  MPa。这主要是在激光抛

光过程中,能量密度呈高斯分布的激光光斑辐照材料表面,使熔池区与基体间存在温度梯度。激光辐照后,熔池中的液态金属冷却,体积收缩受到基体的约束,从而导致抛光表面的残余压应力转变为残余拉应力。

表 4 激光抛光前、后表面残余应力的测试结果

Table 4 Measured surface residual stresses before and after laser polishing

Result	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Mean value
Initial surface residual stress /MPa	$-112.8 \pm 63.1$	$-124.1 \pm 85.3$	$-118.6 \pm 67.7$	$-118.5 \pm 72.0$
Polished surface residual stress /MPa	$124.3 \pm 69.4$	$152.6 \pm 78.6$	$141.8 \pm 58.0$	$139.6 \pm 68.7$

### 4.4 抛光层硬度分析

采用显微硬度计测试样品表面硬度。测试时,压头以 0.980665 N 的试验力加载于试样表面光斑搭接区域 15 s。对 5 个不同的样品在激光抛光前、后分别测量 10 次,取算术平均值作为试样最终的硬度值。

由表 5 可知,激光抛光后试样表面的平均硬度值降

低了约 15%。结合上文中的 EDX 能谱分析结果可知,激光抛光导致抛光层内 C 元素的质量分数降低了约 2.4%。对于不锈钢来说,随着 C 元素含量的减少,其表面硬度也会随之降低。这是由于 C 元素易与不锈钢中的某些元素(主要是 Cr 元素)在晶界处以非均匀形核方式形成碳化物<sup>[18]</sup>,随着 C 含量的降低,碳化物数量会明显减少<sup>[19]</sup>,从而试样浅层金属发生了软化现象。

表 5 激光抛光前、后表面的硬度值  
Table 5 Surface hardnesses before and after laser polishing

Result	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Mean value
Initial surface hardness /HV	359	362	346	333	326	345.2
Polished surface hardness /HV	294	296	287	295	288	292.0

#### 4.5 抛光层的耐腐蚀性分析

在电化学工作站中进行激光抛光前、后试样的耐腐蚀性试验,在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中设置参比电极为饱和甘汞电极(SCE)、辅助电极为铂丝、工作电极为 304 不锈钢,并在室温环境中设置扫描电位范围为  $-1 \sim 1$  V,扫描速率为 1 mV/s。

激光抛光前、后 304 不锈钢的极化曲线如图 14 所示,其中  $I$  为自腐蚀电流密度。由塔菲尔线外推法得到原始试样的自腐蚀电位为  $-0.028$  V,自腐蚀电流密度为  $2.858 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,抛光后试样的自腐蚀电位为  $-0.093$  V,自腐蚀电流密度为  $13.836 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,如表 6 所示。Faraday 第二定律指出,腐蚀速率与腐蚀电流密度的大小成正比<sup>[20]</sup>,这表明激光抛光造成了试样表面耐腐蚀性能的降低。主要原因有以下两方面,一方面不锈钢中存在较高含量的 Cr 元素,能在钢的表面形成致密的氧化膜,有效抑制腐蚀性 Cl 的侵入<sup>[21]</sup>。而激光抛光使原始试样表面的氧化膜遭到破坏或脱落,且高温造成抛光层内 Cr 元素含量降低,抛光表面再次生成的氧化膜的致密程度及厚度均低于原始表面,从而导致耐腐蚀性变差。另一方面激光抛光使试样抛光层内的晶粒细化,存在残余拉应力。残余拉应力的不断作

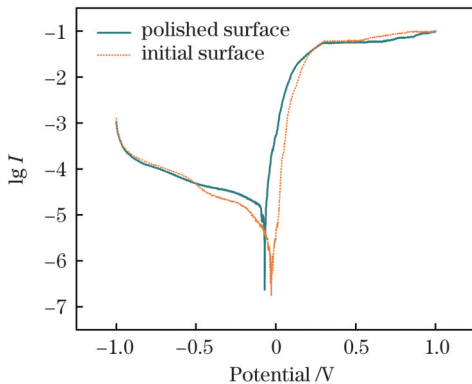


图 14 激光抛光前、后 304 不锈钢的极化曲线

Fig. 14 Polarization curves of 304 stainless steel before and after laser polishing

表 6 激光抛光前、后 304 不锈钢的自腐蚀电位与自腐蚀电流密度

Table 6 Self-corrosion potentials and self-corrosion current densities of 304 stainless steel before and after laser polishing

Surface	Self-corrosion potential /V	Self-corrosion current density /( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
Initial surface	$-0.028$	2.858
Polished surface	$-0.093$	13.836

用使新生成的氧化膜持续破裂,形成裂纹,晶粒细化使晶界增多,这共同增加了腐蚀性 Cl 的快速扩散路径<sup>[22]</sup>,导致材料耐腐蚀性下降。

## 5 结 论

在光纤脉冲激光器抛光 AISI304 不锈钢的正交试验中,将激光功率、重复频率、离焦量和扫描速度作为影响因素,以表面粗糙度作为评价指标,得出了激光抛光的工艺参数优化组合,并且系统地分析了激光抛光前、后的表面性能变化及机理。对正交试验结果进行了极差分析,得出了各因素对激光抛光效果的影响程度,按影响程度从大到小依次排序为离焦量、激光功率、重复频率、扫描速度。最优工艺参数组合为:激光功率  $P=12$  W,离焦量  $h=2$  mm,重复频率  $f=70$  kHz,扫描速度  $v=1750$  mm/s,对应单个光斑的平均能量密度为  $2.82 \text{ J}/\text{cm}^2$ ,横、纵向光斑重叠率分别为 72% 和 66%。在此优化工艺参数组合下,可将试样表面粗糙度由  $R_a=0.5724 \mu\text{m}$  降低至  $R_a=0.1903 \mu\text{m}$ 。经过激光抛光后,试样表面的显微硬度降低了约 15%,自腐蚀电流密度由  $2.858 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  提高至  $13.836 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。抛光层内 C、Cr 元素的质量分数分别降低了约 2.4% 和 3.2%,平均晶粒尺寸由  $3.24 \mu\text{m}$  细化至  $2.87 \mu\text{m}$ ,抛光表面产生了  $(139.6 \pm 68.7)$  MPa 的残余拉应力,同时激光抛光还促使了  $\gamma$  向  $\alpha$  的转变。通过分析得出,随着 C 元素含量的减小,材料表面碳化物的数量也会减少,从而 304 不锈钢表面的显微硬度有所降低。抛光层内 Cr 元素含量的减少使得试样表面新生成的氧化膜的致密程度低于原始表面,弱化了钢的钝化能力。同时,残余拉应力的不断作用导致新生成的氧化膜持续破裂,形成裂纹,且晶粒细化使晶界增多,这共同为腐蚀性 Cl 提供了快速扩散路径,使得试样在激光抛光后的表面耐腐蚀性下降。

## 参 考 文 献

- [1] Kang D, Zou P, Wu H, et al. Research on ultrasonic vibration-assisted laser polishing of the 304 stainless steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 403-417.
- [2] Xu J L, Zou P, Wang W J, et al. Study on the mechanism of surface topography evolution in melting and transition regimes of laser polishing[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 139: 106947.
- [3] Chen C, Tsai H L. Fundamental study of the bulge structure generated in laser polishing process[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 54-61.
- [4] Hua M, SeDao, Shao T M, et al. Surface transformation of DF-2 steel after continuous mode laser irradiation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192/193: 89-96.



- [5] 那冉, 陈涛. 38CrMoAl 表面 YAG 激光抛光技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 011402.  
Na R, Chen T. Research of YAG laser polishing of 38CrMoAl surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 011402.
- [6] Temmler A, Liu D, Preußner J, et al. Influence of laser polishing on surface roughness and microstructural properties of the remelted surface boundary layer of tool steel H11[J]. Materials & Design, 2020, 192: 108689.
- [7] 廖聪豪, 周静, 沈洪. 增材制造 TC4 钛合金在激光抛光前后的电学腐蚀性能[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0102003.  
Liao C H, Zhou J, Shen H. Electrochemical corrosion behaviors before and after laser polishing of additive manufactured TC4 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0102003.
- [8] Zhou J, Liao C H, Shen H, et al. Surface and property characterization of laser polished Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 380: 125016.
- [9] Lee S, Ahmadi Z, Pegues J W, et al. Laser polishing for improving fatigue performance of additive manufactured Ti-6Al-4V parts[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106639.
- [10] Wang W J, Yung K C, Choy H S, et al. Effects of laser polishing on surface microstructure and corrosion resistance of additive manufactured CoCr alloys[J]. Applied Surface Science, 2018, 443: 167-175.
- [11] 姚建华, 黄锦榜, 王光浩, 等. 线切割高粗糙度表面的脉冲激光抛光机制研究[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402003.  
Yao J H, Huang J B, Wang G H, et al. Pulsed laser polishing mechanism on high roughness surface cut by wire electrical discharge machining[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402003.
- [12] 任英明, 张志宇. 双步激光辐射提升纳秒激光抛光单晶硅的表面[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0714004.  
Ren Y M, Zhang Z Y. Surface of nanosecond laser polished single-crystal silicon improved by two-step laser irradiation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0714004.
- [13] 黄旭东, 王涛, 胡少武, 等. 基于正交试验和响应面法的激光抛光参数优化[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1114004.  
Huang X D, Wang T, Hu S W, et al. Parameter optimization of laser polishing based on orthogonal experiment and response surface method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1114004.
- [14] 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]. 天津: 天津大学, 2011: 35-42.
- Zhang F L. Study on micro-polishing theory and technique of metal materials using UV nanosecond pulsed laser[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011: 35-42.
- [15] 狄洪亮, 张心明. 半导体激光器抛光 1.2333 模具钢工艺参数优化研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(2): 37-41.  
Di H L, Zhang X M. Optimization of process parameters of 1.2333 die steel polished by semiconductor lasers[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43(2): 37-41.
- [16] 赵海朝, 乔玉林, 杜娟, 等. 脉冲激光清洗铝合金表面漆层的技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602121.  
Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Research on paint removal technology for aluminum alloy using pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602121.
- [17] Jasim H A, Demir A G, Previtali B, et al. Process development and monitoring in stripping of a highly transparent polymeric paint with ns-pulsed fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 93: 60-66.
- [18] 陈鑫, 钱波, 李腾飞. 碳元素含量对 SLM 成形 316L 不锈钢机械性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(5): 804-809.  
Chen X, Qian B, Li T F. Influence of carbon content on mechanical properties of 316L stainless steel via SLM[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(5): 804-809.
- [19] 李伟. 碳含量及固溶温度对 SLM 成形 GH3230 微观组织及力学性能的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 26-36.  
Li W. Effect of carbon content and solid solution temperature on microstructure and mechanical properties of GH3230 formed by selective laser melting[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 26-36.
- [20] Liu H W, Fu C Y, Gu T Y, et al. Corrosion behavior of carbon steel in the presence of sulfate reducing bacteria and iron oxidizing bacteria cultured in oilfield produced water[J]. Corrosion Science, 2015, 100: 484-495.
- [21] 董瀚, 廉心桐, 胡春东, 等. 钢的高性能化理论与技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 558-582.  
Dong H, Lian X T, Hu C D, et al. High performance steels: the scenario of theory and technology[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 558-582.
- [22] Wang Y, Li K Y, Scenini F, et al. The effect of residual stress on the electrochemical corrosion behavior of Fe-based amorphous coatings in chloride-containing solutions[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 302: 27-38.

## Optimization of Laser Polishing Parameters of 304 Stainless Steel and Performance Analysis of Polishing Layer

Li Daoqi, Wang Tao\*, Yang Zifan, Li Yubin, Wang Shuwen

College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

### Abstract

**Objective** As a new technology for laser surface treatment, laser polishing has the advantages of being a no-contact and non-polluting approach with high controllability. Laser polishing is accompanied by rapid heating and cooling of the shallow metal layer in the area being polished. Changes in polishing layer performance and their causes must be multifaceted. Few studies have been conducted on the performance changes and mechanisms associated with the pulse laser polishing process. Moreover, the variation trend of element content has not been considered while analyzing the mechanism of polishing layer performance in previous studies. In this study, an orthogonal experiment of laser polishing of AISI304 stainless steel is conducted; the correlation among various process parameters is analyzed, and the optimal combination of process parameters for achieving high polishing performance is determined. In addition, the properties of

the surface before and after laser polishing are evaluated, and the mechanism of the properties of the polishing layer is analyzed based on grain size, residual stress, and variations in the element content. We expect that our findings will serve as a reference for improving metal surface quality using laser-polishing technology in future.

**Methods** In this study, the laser power, repetition frequency, defocus distance, and scanning speed of the pulse laser are considered as the influencing factors, and surface roughness is used as the evaluation index to design an orthogonal laser polishing experiment. The polishing route has a “bow” shape [Fig. 3(b)], with a 0.03 mm gap between the filling lines. The three-dimensional (3D) morphology of the surface is observed using an optical microscope, and the surface roughness is measured using a probe roughness instrument. The surface microhardness values of the samples are measured using a Vickers hardness tester. In addition, electrochemical polarization tests are conducted in an electrochemical workstation to detect the corrosion resistance before and after laser polishing. The polished layer is subsequently analyzed using scanning electron microscopy, electron backscatter diffraction, X-ray diffraction, and residual stress detection analyses.

**Results and Discussion** Laser polishing with the optimal combination of process parameters reduces the surface roughness of 304 stainless steel by approximately 67%. After laser polishing, the mass fraction of C and Cr in the polished layer decreases by 2.4% and 3.2%, respectively [Figs. 8(b), 8(d), 9(b), and 9(d)], while the average grain size decreases by 0.37  $\mu\text{m}$  (Fig. 13). The polished surface generates the residual tensile stress of approximately  $(139.6 \pm 68.7)$  MPa (Table 4). The hardness test reveals that the surface microhardness of 304 stainless steel decreases by approximately 15% (Table 5). This is primarily due to the decrease in the C content, which reduces the amount of carbides on the surface of the material. Electrochemical tests reveal that the corrosion current density increases by  $10.978 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  after laser polishing (Table 6), primarily because the reduction in the Cr content weakens the passivation ability of stainless steel. Concurrently, grain refinement and residual tensile stress provide a rapid diffusion path for corrosive Cl.

**Conclusions** In the orthogonal experiment of the pulsed laser polishing of AISI304 stainless steel, the laser power, repetition frequency, defocus distance, and scanning speed are considered as the influencing factors, and the surface roughness is used as the evaluation index. The optimal combination of laser polishing process parameters has been obtained. Before and after laser polishing, the changes and mechanisms of the surface properties have been systematically analyzed. The following conclusions are drawn. 1) According to the range analysis of the orthogonal experimental results, the defocus distance, laser power, repetition frequency, and scanning speed have the highest impact on the laser polishing effect. The optimized combination of process parameters is as follows: the laser power is 12 W; the defocus distance is 2 mm; the repetition frequency is 70 kHz; the scanning speed is 1750 mm/s, the energy density of a single laser spot is  $2.82 \text{ J}/\text{cm}^2$ ; the overlap rate of the transverse spot is 72%; the overlap rate of the longitudinal spot is 66%; the surface roughness of the sample can be rapidly changed from  $R_a=0.5724 \mu\text{m}$  to  $R_a=0.1903 \mu\text{m}$ . 2) Following laser polishing, the microhardness of the sample surface decreases by approximately 15%; the self-corrosion current density increases from  $2.858 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  to  $13.836 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; the mass fractions of C and Cr in the polished layer decrease by approximately 2.4% and 3.2%, respectively, and the average grain size is refined by approximately 0.37  $\mu\text{m}$ . The polished surface has a residual tensile stress of approximately  $(139.6 \pm 68.7)$  MPa, and laser polishing enhances the conversion of  $\gamma$  to  $\alpha$ . 3) Considering the analysis results, the decrease in the C element content reduces the amount of carbides on the surface of the material, thereby decreasing the surface microhardness of 304 stainless steel. The decrease in the Cr content in the polishing layer causes the newly formed oxide film on the surface of the sample to be less dense than that on the original surface. Simultaneously, the continuous action of residual tensile stress causes cracks in the newly formed oxide film, and grain refinement increases the grain boundaries, providing a rapid diffusion path for corrosive Cl. Consequently, the corrosion resistance of 304 stainless steel is reduced.

**Key words** laser technique; laser polishing; 304 stainless steel; orthogonal experiment; parameter optimization; performance analysis