

# 激光与光电子学进展

## 激光清洗 FV520B 钢表面氧化色工艺参数对表面粗糙度的影响

邓德伟<sup>1,2</sup>, 范清华<sup>1</sup>, 赵祥路<sup>1</sup>, 马玉山<sup>3</sup>, 黄冶冶<sup>2</sup>, 孙奇<sup>2</sup>, 杨树华<sup>2</sup>, 张勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大连理工大学材料科学与工程学院辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室, 辽宁 大连 116024;

<sup>2</sup>沈阳鼓风机集团股份有限公司, 辽宁 沈阳 110869;

<sup>3</sup>吴忠仪表有限责任公司, 宁夏 吴忠 751100

**摘要** 采用波长为 1064 nm 的脉冲光纤激光器对 FV520B 合金钢表面的高温氧化色层进行清洗, 以激光功率、脉冲频率、清洗次数和基体原始粗糙度作为变量, 考察各参数对试样表面氧化色清除效果及清洗后表面粗糙度的影响规律。研究表明: 对于 200#砂纸打磨的预处理样品(粗糙度约为 0.503  $\mu\text{m}$ ), 当清洗激光功率为 40~120 W 时, 清洗后试样表面粗糙度无明显变化, 当激光功率为 120~200 W 时, 随着激光功率的增大, 粗糙度逐渐减小; 在激光功率为 120 W、脉冲频率为 20 kHz 的条件下, 对 200#砂纸打磨的预处理样品(粗糙度约为 0.503  $\mu\text{m}$ )进行多次清洗, 当清洗次数达到 2 时, 粗糙度显著降低(粗糙度降低 40.8%), 继续增大清洗次数, 粗糙度降低效果不明显, 确定最佳清洗参数为激光功率 120 W、脉冲频率 20 kHz、清洗次数 2。此外, 当清洗参数一定时, 随着预处理试样初始粗糙度的减小, 氧化色层的去除率下降, 且清洗后粗糙度的降低效果不明显。

**关键词** 激光光学; 激光清洗; 氧化色; FV520B 钢; 粗糙度; 表面处理

中图分类号 TN249

文献标志码

doi: 10.3788/LOP202158.2114005

## Influence of Processing Parameters on Surface Roughness for Laser Cleaning of FV520B Steel Oxide Layer

Deng Dewei<sup>1,2</sup>, Fan Qinghua<sup>1</sup>, Zhao Xianglu<sup>1</sup>, Ma Yushan<sup>3</sup>, Huang Zhiye<sup>2</sup>, Sun Qi<sup>2</sup>,  
Yang Shuhua<sup>2</sup>, Zhang Yong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology(Liaoning Province), School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

<sup>2</sup>Shenyang Blower Works Group Corporation, Shenyang, Liaoning 110869, China;

<sup>3</sup>Wuzhong Instrument Co., Ltd., Wuzhong, Ningxia 751100, China

**Abstract** The pulsed 1064 nm fiber laser is used to clean the thermal oxide layer of FV520B steel. The effects of processing parameters including laser power, pulse frequency, cleaning times, and substrate roughness, on the cleaning effectiveness of thermal oxide layer and the surface roughness after cleaning are investigated. The results show that for the pretreated samples (the roughness is approximately 0.503  $\mu\text{m}$ ) by polishing with 200# abrasive paper, the surface roughness remains almost unchanged after cleaning in the laser power range of 40–120 W, while the roughness decreases with increasing power in the range of 120–200 W. When the above pretreated samples are cleaned under laser power of 120 W and pulse frequency of 20 kHz, the surface roughness presents an obvious

收稿日期: 2021-03-03; 修回日期: 2021-03-04; 录用日期: 2021-03-12

基金项目: 辽宁重大装备制造协同创新中心基金(DUT2017031)、高端控制阀产业技术协同创新中心基金(2018WZ003)

通信作者: deng@dlut.edu.cn

decrease (dropped by nearly 40.8 %) after laser cleaning for two times, and the roughness does not basically decrease with the increase of cleaning times. In addition, under the same laser cleaning parameters, the cleaning effectiveness of oxide layer becomes lower and the roughness does not exhibit any obvious change with the decrease in roughness of pretreated samples.

**Key words** laser optics; laser cleaning; oxide layer; FV520B steel; roughness; surface treatment

**OCIS codes** 140. 3390; 140. 3538; 240. 5450; 240. 5770

## 1 引言

随着工业技术的发展,传统表面清洗手段如喷丸、喷砂、机械摩擦、超声、化学清洗等方法逐渐难以满足现代化工业清洗的要求,寻找一种环境友好、不损伤基体、高效且可控性好的清洗方法成为清洗技术发展的新趋势<sup>[1-2]</sup>。激光清洗是一种新型的表面清洗方式,具有非接触、绿色环保无污染、不损伤基材、适用范围广等一系列优良特性。通过非接触的方式,脉冲激光直接照射在污染物表面,可以通过气化、烧蚀、振动、相爆炸、等离子体冲击等方式去除表面污物,对基体损伤较小,并且激光清洗具有高效可控的特点,易于实现自动化,是一种发展前景广阔的新型清洗方法<sup>[3-9]</sup>。

大型离心压缩机叶轮装配过程中多采用过盈装配,其中热装法是加热叶轮使其膨胀,并与轴进行装配,冷却后实现过盈配合。在这一过程中,由于叶轮在高温条件下发生氧化,极易在表面形成氧化色。氧化色的形成既影响工件的使用性能,又影响其美观<sup>[6]</sup>。传统的清除氧化色的方法多为人工纱布打磨法,该方法会对叶轮基体造成磨损,改变叶轮粗糙度。粗糙度的存在与变化会影响流体绕流与边界层特性<sup>[9]</sup>,进而有可能影响叶轮的力学性能。

目前,关于激光清洗导致表面粗糙度变化的研究较少,而针对钢材表面高温氧化色的激光清洗对粗糙度影响的研究也报道不多<sup>[10-17]</sup>。本文采用脉冲光纤激光器,对FV520B钢表面的高温氧化色进行激光清洗,探究激光功率、脉冲频率、清洗次数、试样原始粗糙度等材料表面氧化色清洗效果和清洗后表面粗糙度的影响规律。

## 2 实验

### 2.1 实验设备及参数

本文选用波长为1064 nm的RFL-P200脉冲光纤激光器,输出光斑被整形为能量分布均匀的矩形光斑,通过光纤实现柔性传输。激光器的工作性能

参数如表1所示。将激光输出头固定于FANUC R30i机械臂上,以精确控制离焦量及激光束在垂直于光斑扫描方向上的移动速度。此外,将烟尘净化器的吸尘罩置于清洗试样侧上方,用于收集清洗过程产生的烟尘。激光清洗系统的装置如图1所示。

表1 设备参数

Table 1 Device parameters

Parameter	Content
Laser	Pulsed fiber laser
Wavelength /nm	1064
Laser spot size /( $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )	$(400 \pm 20) \times (400 \pm 20)$
Focal length /mm	140
Laser scanning width /mm	100
Pulse duration /ns	$100 \pm 10$
Maximum power /W	200
Maximum pulse frequency /kHz	50

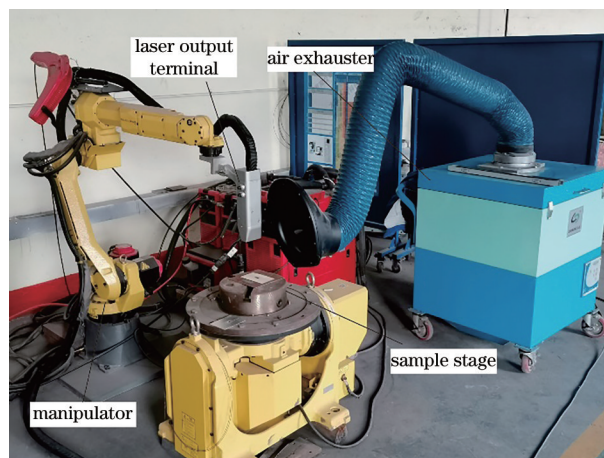


图1 激光清洗设备

Fig. 1 Laser cleaning equipment

考虑到在光斑扫描方向(横向)以及在垂直于光斑扫描方向(纵向)两个方向上的运动,实际清洗时光斑的移动路径为“Z”折线形,为尽量使清洗试样的光斑重叠率一致,将边长为20 mm的方形待清洗试样置于横向扫描路径(幅宽100 mm)中央,示意图如图2所示。

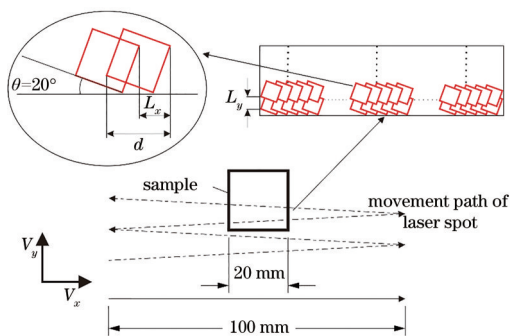


图 2 扫描路径及光斑重叠示意图

Fig. 2 Schematic of laser scanning path and spot overlap

光斑横向搭接率  $\eta_x$  与振镜的扫描速度和脉冲频率有关,中心点处纵向光斑搭接率  $\eta_y$  与振镜扫描速度、幅宽及机械手臂移动速度有关<sup>[18-19]</sup>,两个方向上的光斑搭接率为

$$\eta_x = 1 - \frac{L_x}{d} = 1 - \frac{v_x}{fd}, \quad (1)$$

$$\eta_y = 1 - \frac{L_y}{d} = 1 - \frac{bv_y}{dv_x}, \quad (2)$$

表 2 FV520B 钢板的元素成分

Table 2 Element contents of FV520B steel plate

Element	C	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo	Si	Mn	P	S	Fe
Mass fraction / %	0.05	13.72	5.65	1.71	0.01	0.05	1.44	0.36	0.52	0.027	0.027	Bal.

使用 Olympus OLS4000 3D 激光共聚焦显微镜 (LSCM) 测量制备的小方块试样的粗糙度及表面轮廓,采用 Zeiss SUPRA 55 场发射扫描电镜 (FE-SEM) 进行微观形貌观察,借助 Thermo Fisher ESCALAB XI+ 型 X 射线光电子能谱

式中:  $L_x$  和  $L_y$  分别为横向和纵向相邻光斑间距;  $v_x$  和  $v_y$  分别为振镜扫描速度和机械手移动速度;  $f$  为脉冲频率;  $d$  为光斑投影宽度;  $b$  为激光扫描幅宽(设置为 100 mm)。本实验采用矩形光斑,由于设备限制,光斑与横向移动方向的夹角( $\theta$ )为  $20^\circ$ ,故  $d = \sqrt{2} l \times \cos 25^\circ$ ,其中  $l$  为光斑边长。由(1)、(2)式计算可得,本实验横向光斑搭接率  $\eta_x$  均为 51.2%,纵向光斑搭接率  $\eta_y$  为 41.5%~61.0%。

## 2.2 实验材料与方法

激光清洗基板为热轧 FV520B 钢板,其合金元素成分如表 2 所示,采用线切割将 7 mm 厚的 FV520B 热轧钢板切成 20 mm × 20 mm × 7 mm 尺寸的试样,分别选择 200#、400#、600#、800# 砂纸对试样待激光清洗表面进行打磨以获得不同粗糙度,经超声清洗后,将试样放入炉中,在 350 °C 下保温 2.5 h,随后空冷处理,制备得到基体粗糙度不同的表面氧化色试样。

(XPS) 对氧化层厚度及成分进行表征。本文采用单因素变量法,以激光功率、脉冲频率、扫描次数和基体粗糙度作为变量,考察各因素对试样表面氧化层及粗糙度的影响规律,设计的实验方案参数如表 3 所示。

表 3 实验参数

Table 3 Experimental parameters

Investigation factor	Abrasive grade for grinding pretreatment / #	Laser power	Pulse frequency	Cleaning time
		$P / W$	$f / \text{kHz}$	
Power	200	40, 80, 120, 160, 200	20	1
Frequency	200	120	20, 30, 40, 50	1
Cleaning time	200	120	20	1, 2, 3, 4, 5, 10
Initial roughness of substrate	200, 400, 600, 800	120	20	1, 2

## 3 结果与讨论

采用 XPS 对 FV520B 钢抛光试样表面的高温氧化层进行成分表征和厚度剖析<sup>[20]</sup>,为了降低表面形貌引起的检测误差,选用抛光后制备的氧化色试样进行测试。测得的氧化层厚度值较为接近金属表面氧化层的实际生长厚度,由于保温时间较短,表面粗糙度的变化并不会对基体表面氧化层厚度产生显著影响,

各粗糙度试样基体表层的氧化层厚度应基本一致。

图 3 为氧化色试样的全谱扫描图,通过谱线标定可以确定其主要成分为 Fe、Cr 的氧化物<sup>[21]</sup>。对于不同深度氧化层和基体的成分测试,通过离子束对表层的逐层刻蚀剥离来实现,刻蚀离子能量设定为 4 keV,每次刻蚀时长为 60 s,通过参比物溅射速率估算得到每次对应的刻蚀深度约为 30 nm。图 4 为元素含量随刻蚀时间的变化曲线,可以看出,当刻

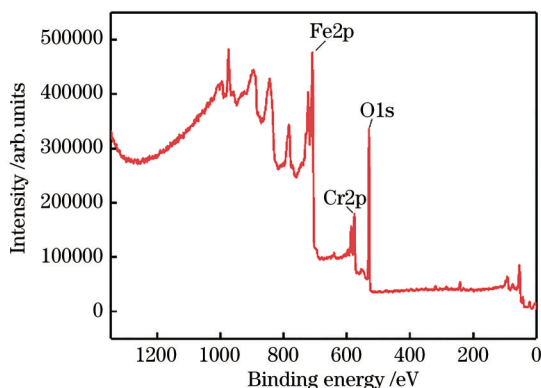


图 3 FV520B 钢氧化色试样的 XPS 全谱图

Fig. 3 XPS full spectrum of FV520B steel oxide layer sample

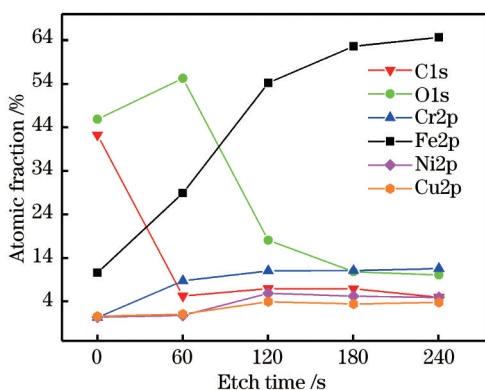


图 4 抛光后制备的 FV520B 钢氧化色试样的元素含量

Fig. 4 Element contents of FV520B steel oxide layer sample prepared by polishing

蚀 3 次 (180 s) 时, 随着刻蚀深度的增加, 氧元素含量不再变化, 表明刻蚀深度已达到基体, 因此推断氧化层厚度约为 90 nm。

图 5 给出了不同粒度砂纸打磨的 FV520B 钢试样基体和制备的氧化色试样粗糙度, 200# 砂纸打磨

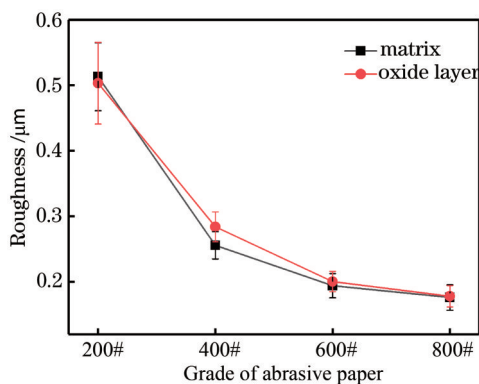


图 5 不同砂纸打磨的 FV520B 钢基体和制备的氧化色试样的粗糙度

Fig. 5 Roughness of prepared FV520B steel samples with and without oxide layer for different abrasive papers

的基体和制备的氧化色试样的粗糙度相近, 约为 0.503 μm, 随着打磨砂纸目数的增大, 试样的粗糙度逐渐降低。

单次激光脉冲下的光斑能量密度与激光功率、脉冲频率和光斑面积相关, 对于矩形光斑, 有

$$I = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{l^2} = \frac{P}{l^2 f}, \quad (3)$$

式中:  $I$  为单脉冲能量密度 ( $J/cm^2$ );  $Q$  为激光脉冲能量 ( $J$ );  $S$  为光斑面积 ( $cm^2$ );  $l$  为矩形光斑边长 ( $cm$ );  $P$  为平均激光功率 ( $W$ )。

### 3.1 功率对激光清洗样品粗糙度的影响

为了考察激光功率对 FV520B 钢氧化色样品清洗后的表面粗糙度的影响, 分别选用 40, 80, 120, 160, 200 W 激光功率, 在 20 kHz 频率下对 200# 砂纸打磨后制备的高温氧化色样品进行单次清洗。清洗后试样的粗糙度变化曲线如图 6 所示。清洗前原始试样的粗糙度为 0.503 μm (如图 5 所示), 在清洗激光功率不高于 120 W 时, 试样表面粗糙度变化不明显, 当激光功率高于 120 W 时, 随着功率的增大, 粗糙度逐渐减小。

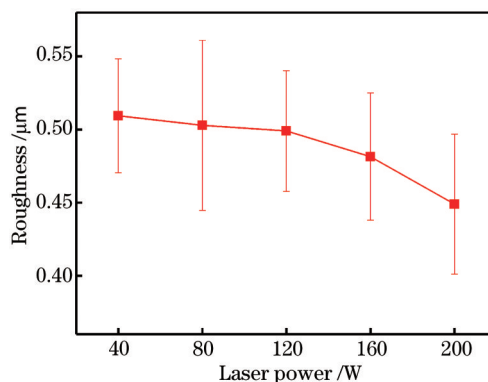


图 6 当频率为 20 kHz 时, FV520B 钢氧化色试样清洗后的粗糙度

Fig. 6 Roughness of FV520B steel oxide layer sample after cleaning when frequency is 20 kHz

图 7 所示为与图 6 对应的在各功率下清洗后及清洗前氧化色试样的表面形貌。从图 7(a) 中可以看出, 经 200# 砂纸打磨后制备的氧化色试样的表面磨痕明显, 氧化色层为黄褐色。经 40 W 功率清洗后 [图 7(b)], 表面颜色无明显变化, 氧化色层未被有效去除。经 80 W 功率清洗后 [图 7(c)], 表面颜色变浅, 氧化色层被部分去除, 粗糙度无明显变化, 说明氧化色层的去除对该试样粗糙度的影响较小。如图 7(d) 所示, 当功率到达 120 W 时, 基体表面的黄褐色的氧化色层被完全清除, 表面呈灰白色且未

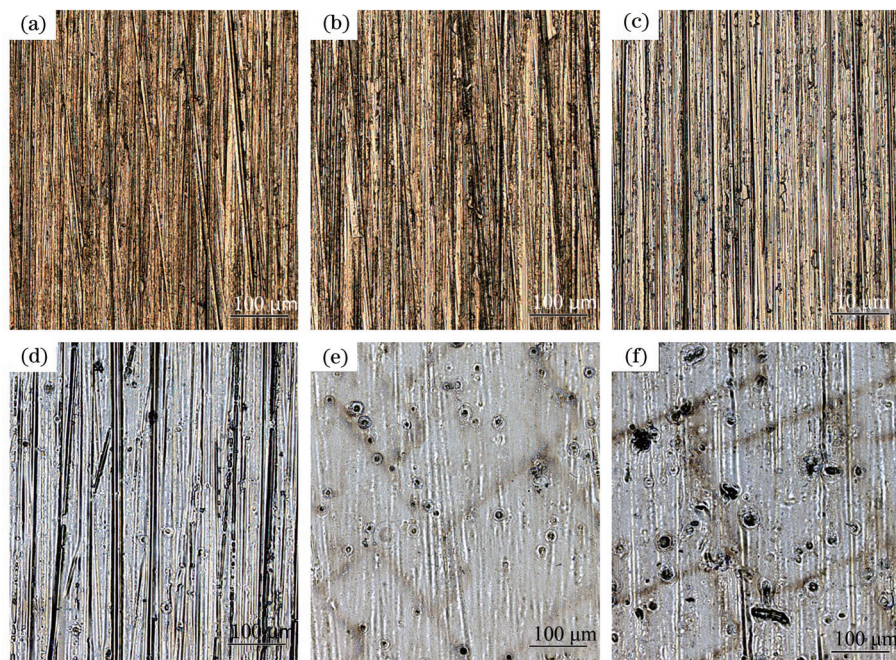


图 7 FV520B 钢氧化色试样在激光清洗前及不同功率清洗后的表面形貌。(a) 激光清洗前；(b) 激光功率为 40 W；(c) 激光功率为 80 W；(d) 激光功率为 120 W；(e) 激光功率为 160 W；(f) 激光功率为 200 W

Fig. 7 Surface morphologies of FV520B steel oxide layer samples before and after laser cleaning for different powers. (a) Before cleaning; (b) cleaning with power of 40 W; (c) cleaning with power of 80 W; (d) cleaning with power of 120 W; (e) cleaning with power of 160 W; (f) cleaning with power of 200 W

发现明显光斑烧蚀痕迹,此时的粗糙度与基体的粗糙度近似。由前述分析可知,高温氧化色层的成分为金属氧化物,其与钢材锈层的激光清洗机制相同,主要为激光烧蚀。如图 7(e)、(f)所示,当功率升高至 160 W 及以上时,清洗后表面留有部分矩形烧蚀痕迹。这是由于受设备自身属性的限制,方形激

光光斑内部的能量分布均匀,而边缘处的能量密度略高,在较高功率下光斑边缘处的激光能量密度达到烧蚀阈值,因此形成了烧蚀痕迹。

图 8 给出了当频率为 20 kHz 时经 200#砂纸打磨后制备的氧化色试样清洗后的扫描电镜(SEM)图。如图 8(a)、(b)所示,当清洗功率为 40 W 和

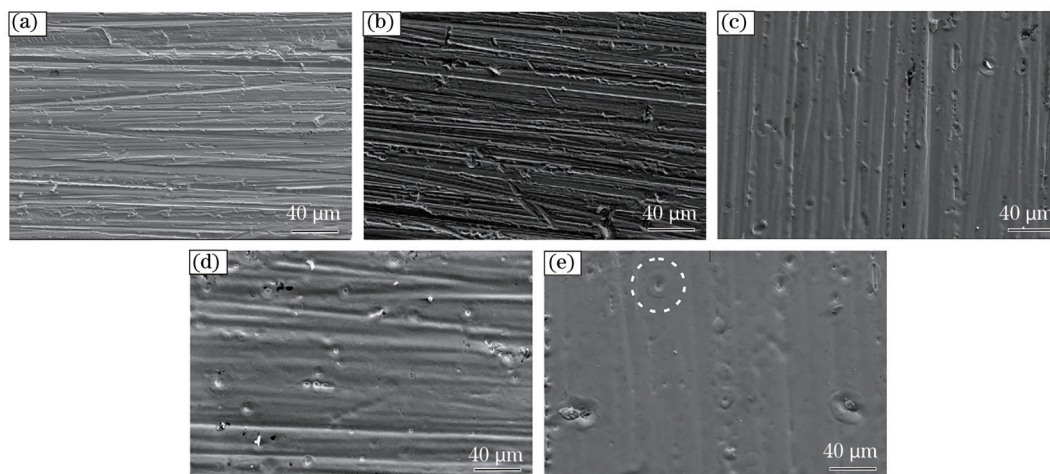


图 8 当脉冲频率为 20 kHz 时, FV520B 钢氧化色试样在不同激光功率下清洗后的 SEM 图。(a) 40 W; (b) 80 W; (c) 120 W; (d) 160 W; (e) 200 W

Fig. 8 SEM images of FV520B steel oxide layer samples after laser cleaning with different laser powers when pulse frequency is 20 kHz. (a) 40 W; (b) 80 W; (c) 120 W; (d) 160 W; (e) 200 W

80 W 时,局部区域均存在突出的棱边特征且差别不大。从图 8(c)~(e)中可以看出,当功率达到 120 W 时,氧化层被清除掉,光斑辐照到基体表面,出现磨痕棱边熔化的现象;继续增加功率,磨痕的轮廓进一步熔化,表面形貌变得更加平滑。此外,因试样表面残留的砂纸磨粒或局部合金元素富集,光斑辐照时引起热量局部集中,形成了较明显的圆形熔坑,功率越大,熔坑越明显,如图 8(e)圆虚线处所示。在高功率 200 W 下清洗后,试样表面较为平整,沟槽数量减少且轮廓变得非常模糊,表明基体表面出现了一定程度的烧蚀熔化。

### 3.2 频率对激光清洗样品粗糙度的影响

为了研究激光脉冲频率对氧化色清洗样品表面粗糙度的影响,当功率为 120 W 时,分别采用脉冲频率为 20, 30, 40, 50 kHz 的激光对 200#砂纸打磨后制备的氧化色试样进行单次清洗。实验过程中调整光斑扫描速度  $v_x$  及机械手移动速度  $v_y$ , 从而使各频率下清洗时光斑的横向和纵向重叠率保持一致。由 3.1 节分析可知,在 120 W 激光功率和 20 kHz 脉冲频率下才可以将试样表面的氧化色层完全清除。依据(3)式可知,频率与光斑能量密度成反比,随着频率从 20 kHz 升至 50 kHz,能量密度由  $3.75 \text{ J/cm}^2$  降低到  $1.5 \text{ J/cm}^2$ 。如图 9 所示,清洗后氧化色试样的颜色由基体的灰白色向氧化色层的黄褐色逐渐过渡,氧化色层的清除量逐渐减少,当频率为 50 kHz 时氧化色层不能被有效去除。图 10 给出了清洗后试样粗糙度的变化曲线,可以看出,不同频率下清洗后,试样粗糙度未发生明显变化,表明此初始状态下氧化色层的清除程度对试样表面粗糙度无显著影响。

### 3.3 清洗次数对激光清洗样品粗糙度的影响

图 11 给出了 200#砂纸打磨后制备的氧化色试样在 120 W 激光功率和 20 kHz 脉冲频率下经不同次数激光清洗后的粗糙度,清洗次数为 1、2、3、4、5 和 10。如图 11 所示,激光清洗 2 次后,试样表面粗糙度大幅降低,由清洗 1 次后的  $0.495 \mu\text{m}$  降至  $0.302 \mu\text{m}$ ,但是当清洗次数由 2 继续增加时,粗糙度的变化幅度较小,表明激光清洗次数对清洗效果具有饱和效应<sup>[12]</sup>,清洗次数达到 2 时即可实现粗糙度显著降低的效果。

图 12 给出了相应次数激光清洗后试样的 SEM 图。可以看出,当清洗次数为 2 时[图 12(b)],试样表面磨痕已发生熔融。其局部区域放大图如

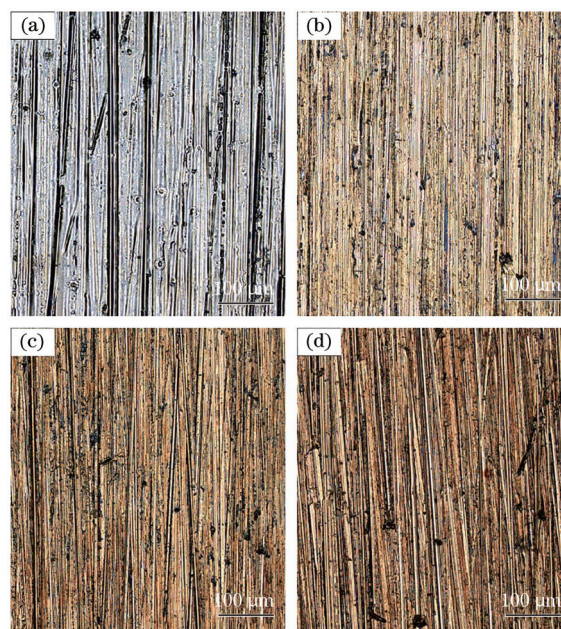


图 9 当激光功率为 120 W 时, FV520B 钢氧化色试样在不同激光频率下清洗 1 次后的表面形貌。(a) 20 kHz; (b) 30 kHz; (c) 40 kHz; (d) 50 kHz

Fig. 9 Surface morphologies of FV520B steel oxide layer samples after one time laser cleaning at different frequencies when laser power is 120 W. (a) 20 kHz; (b) 30 kHz; (c) 40 kHz; (d) 50 kHz

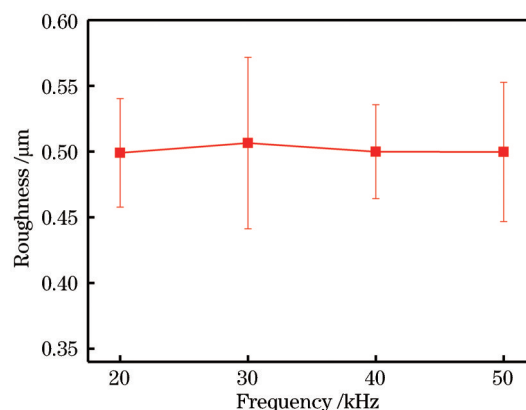


图 10 当激光功率为 120 W 时, FV520B 钢氧化色试样在不同脉冲频率下清洗 1 次后的粗糙度

Fig. 10 Roughness of FV520B steel oxide layer sample after one time laser cleaning at different frequencies when laser power is 120 W

图 12(g) 所示,可以看到,局部较深划痕的棱边发生熔融,棱边熔融后由高处逐渐向下堆积并往两侧扩展,在较深的沟槽处容易形成未被填平的缝隙,而在其两侧,划痕沟槽较浅区域呈现出较为平坦且规整的形貌。从图 12(c)~(f)中可以看出,在激光清洗次数高于 2 后,随着清洗次数的继续增加,试样表

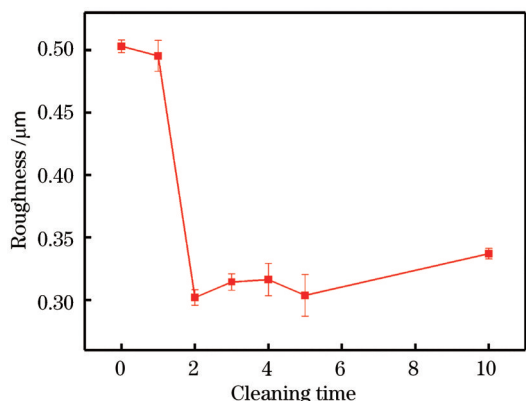


图 11 当激光功率为 120 W, 脉冲频率为 20 kHz 时, FV520B 钢氧化色试样在激光清洗多次后的粗糙度

Fig. 11 Roughness of FV520B steel oxide layer sample after laser cleaning for different cleaning times when laser power is 120 W and pulse frequency is 20 kHz

面形貌不再发生显著变化。

以 200# 砂纸打磨后制备的氧化色样品在 120 W/20 kHz 参数下的清洗为例, 试样在 350 °C 下保温 2 h 后生成厚度约为 90 nm 的氧化色层。如图 13 所示, 当激光束照射在试样磨痕轮廓峰谷表面时, 由于轮廓谷较深, 处于轮廓谷处的激光束经过多次吸收-反射过程<sup>[22-23]</sup>, 试样对激光的吸收量更高。在氧化色层去除后, 部分激光能量被基体吸收, 磨痕轮廓峰裸露于空气中, 与基体间的热量传导较少, 更容易发生熔化。第一次清洗后, 氧化色层被完全清除, 对试样进行第二次清洗时, 激光直接辐照基体并在轮廓谷中发生多次吸收-反射过程, 轮廓峰熔化并填补轮廓谷, 同时轮廓高度下降, 且部分熔化区域出现气孔。因此, 激光清洗氧化色降低试样粗糙度的本质在于基体的熔化。

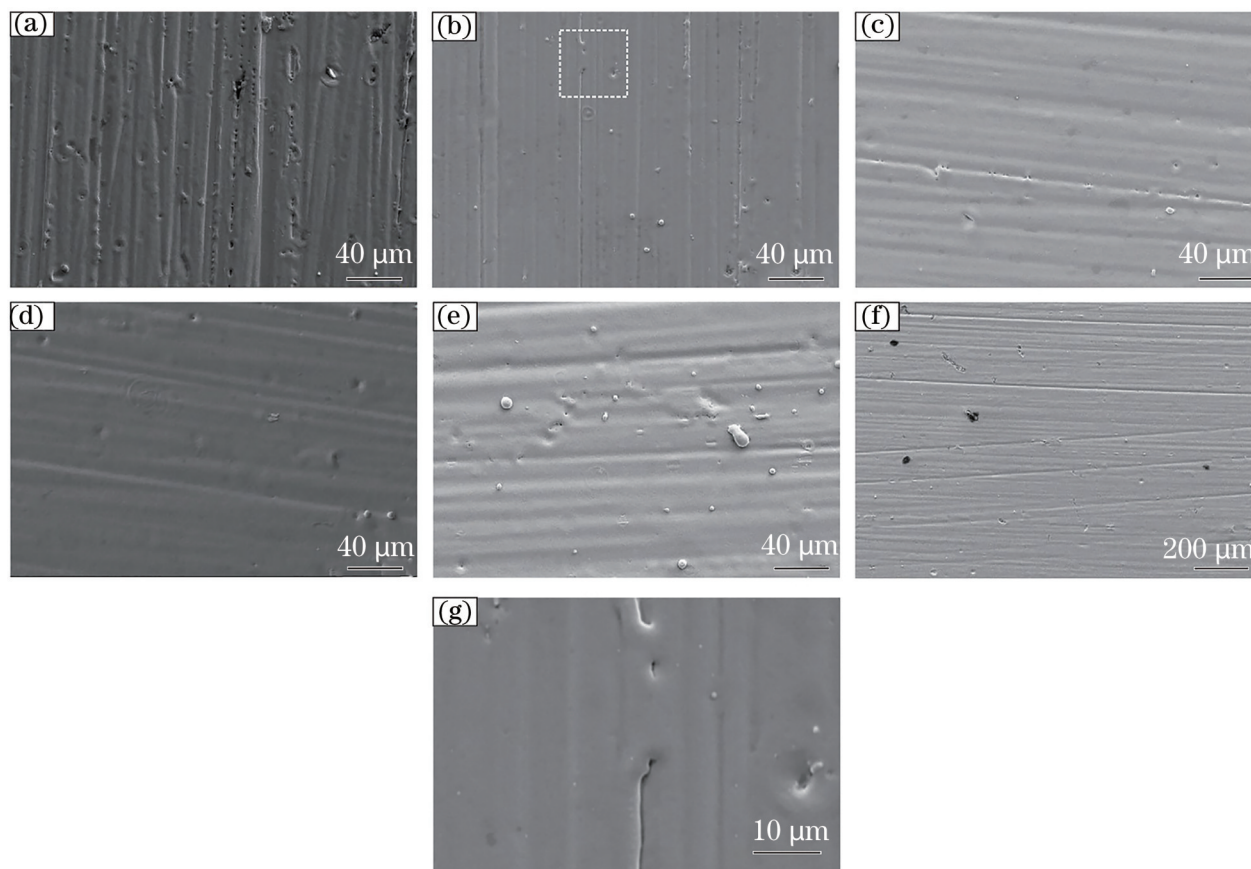


图 12 当激光功率为 120 W, 脉冲频率为 20 kHz 时, 不同次数清洗后氧化色试样的 SEM 图。(a) 1 次; (b) 2 次; (c) 3 次; (d) 4 次; (e) 5 次; (f) 10 次; (g) 图 12(b) 的局部放大图

Fig. 12 SEM images of oxide layer samples after laser cleaning with laser power of 120 W and pulse frequency of 20 kHz for different cleaning times. (a) One time; (b) two times; (c) three times; (d) four times; (e) five times; (f) ten times; (g) locally magnified region in dotted box of Fig. 12 (b)

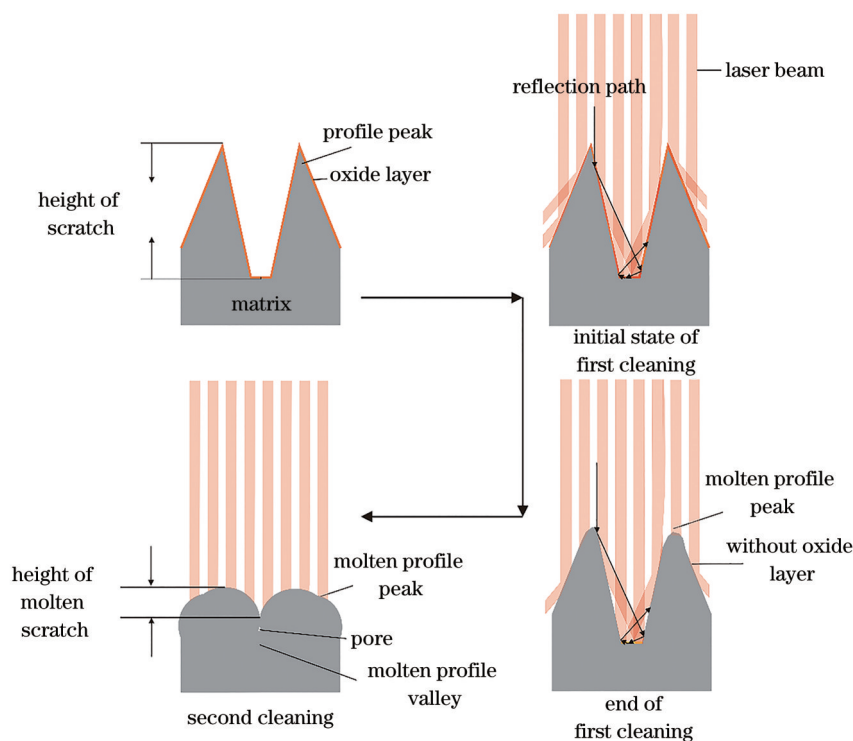


图 13 当激光功率为 120 W, 脉冲频率为 20 kHz 时, FV520B 钢氧化色试样的激光清洗机机制示意图

Fig. 13 Schematic of laser cleaning for FV520B steel oxide layer sample with laser power of 120 W and pulse frequency of 20 kHz

### 3.4 不同初始粗糙度试样在激光清洗后的粗糙度变化

由 3.1 节的实验结果可知, 当脉冲频率为 20 kHz 时, 将氧化色层完全清除的最低功率为 120 W, 对应的能量密度为  $3.75 \text{ J/cm}^2$ 。选择此参数对不同目数砂纸打磨的氧化色样品进行激光清洗, 以探究不同初始粗糙度试样经激光清洗后的粗糙度变化规律。图 14 给出了不同目数砂纸打磨后制备的氧化色试样在 120 W/20 kHz 下激光清洗 1 次和 2 次后的粗糙度柱状图。当仅清洗 1 次时, 不同砂纸打磨的氧化色试样的粗糙度的下降并不明显; 当清洗 2 次时, 200# 砂纸打磨后制备的氧化色试样的粗糙度的降低最为明显, 由 3.3 节可知, 此时磨痕的棱边发生了熔化导致粗糙度降低。

图 15 为不同目数砂纸打磨后制备的氧化色试样在 120 W/20 kHz 参数下清洗 1 次后的表面形貌。由于保温时间较短, 表面粗糙度变化并不会对基体表面氧化层的厚度产生显著影响, 各粗糙度试样基体表面的氧化层厚度基本一致, 且氧化层颜色也较为接近, 均为黄褐色。随着预处理砂纸目数的增加, 如图 15 所示, 清洗后试样表面由接近基体的灰白色向接近氧化色层的黄褐色逐渐过渡, 氧化层的去除量逐渐减少, 表明试样初始粗糙度对激光清洗

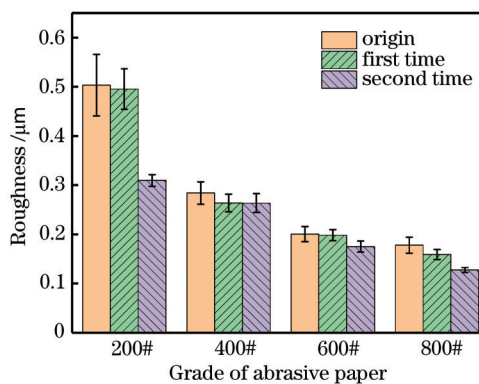


图 14 当激光功率为 120 W, 脉冲频率为 20 kHz 时, 不同目数砂纸打磨制备的氧化色试样在激光清洗 1 次和 2 次后的粗糙度

Fig. 14 Roughness histograms of oxide layer samples prepared after polishing with different grades of abrasive papers and after laser cleaning with laser power of 120 W and pulse frequency of 20 kHz for one time or two times

效果的影响较大。随着初始粗糙度的降低, 试样表面轮廓的高度差降低, 导致激光在试样表面沟槽轮廓谷处的反射次数减少, 试样整体对激光的反射率增大, 吸收效率降低<sup>[23]</sup>, 因此, 氧化色层的去除量减小粗糙度降低不明显。



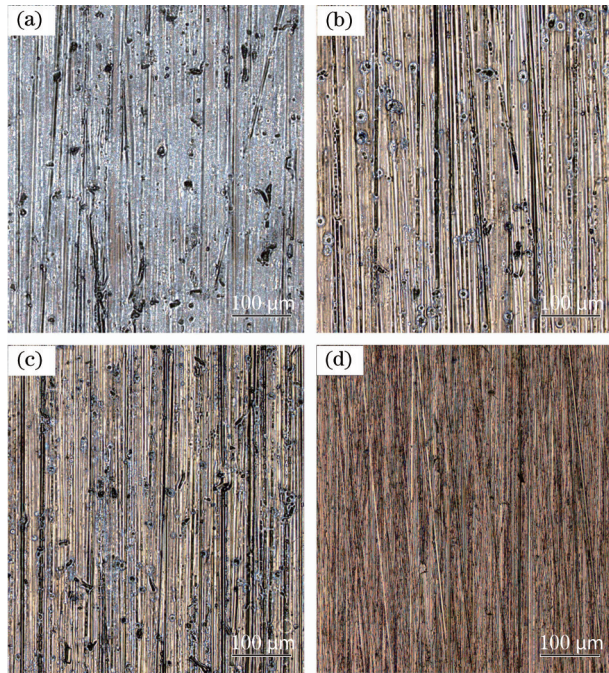


图 15 不同目数砂纸打磨后制备的试样在 120 W/20 kHz 参数下激光清洗 1 次后的表面形貌。(a) 200#; (b) 400#; (c) 600#; (d) 800#

Fig. 15 Surface morphologies of oxide layer samples prepared after polishing with different grades of abrasive papers and after one time laser cleaning with 120 W/20 kHz. (a) 200#; (b) 400#; (c) 600#; (d) 800#

## 4 结 论

选用经砂纸打磨后制备的 FV520B 钢氧化色试样,研究了激光清洗参数和试样原始粗糙度对表面氧化色层清洗效果和清洗后表面粗糙度的影响,得出如下结论。

1) 对于粗糙度为  $0.503 \mu\text{m}$ (经 200#砂纸打磨)的 FV520B 钢高温氧化色样品,在脉冲频率为 20 kHz 时,功率低于 120 W 时,清洗后粗糙度无明显变化,当功率为 120~200 W 时,随着激光功率的增大,粗糙度逐渐减小;当激光功率为 120 W 时,不同频率下清洗试样的粗糙度变化不明显。

2) 200#打磨制备的氧化色试样的最佳清洗参数为 120 W 激光功率和 20 kHz 脉冲频率(能量密度为  $3.75 \text{ J}/\text{cm}^2$ ),清洗 1 次后可将氧化色层有效清除,粗糙度变化不大;清洗 2 次后粗糙度降低了 40.8%,继续增加清洗次数,粗糙度变化不明显。

3) 对于粗糙度分别为  $0.503, 0.264, 0.212, 0.176 \mu\text{m}$ (分别由 200#、400#、600#、800#砂纸打磨

并制备)的氧化色试样,在相同参数即 120 W 激光功率和 20 kHz 脉冲频率下进行激光清洗,随着砂纸目数的增大,氧化色层的去除率逐渐下降,清洗后试样粗糙度的改善效果逐渐减弱。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Status and prospect of laser cleaning procedure[J]. Laser Technology, 2000, 24(2): 68-73.  
王泽敏,曾晓雁,黄维玲.激光清洗工艺的发展现状与展望[J].激光技术,2000,24(2):68-73.
- [2] Zhang G X, Hua X M, Li F, et al. Research and application status of laser de-rusting and de-painting [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(18): 1-4, 8.  
张光星,华学明,李芳,等.激光除锈、除漆的研究与应用现状[J].热加工工艺,2019,48(18):1-4,8.
- [3] Klein S, Fekrsanati F, Hildenhagen J, et al. Discoloration of marble during laser cleaning by Nd:YAG laser wavelengths[J]. Applied Surface Science, 2001, 171(3/4): 242-251.
- [4] Song F, Wu Y X, Liu S J. History of laser cleaning development[J]. Cleaning World, 2005, 21(6): 37-40.  
宋峰,伍雁雄,刘淑静.激光清洗的发展历程[J].清洗世界,2005,21(6):37-40.
- [5] Jiang Y L, Ye Y Y, Zhou G R, et al. Research on laser paint removing of aircraft surface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 29-35.  
蒋一岚,叶亚云,周国瑞,等.飞机蒙皮的激光除漆技术研究[J].红外与激光工程,2018,47(12):29-35.
- [6] Shi X Q. Discussion of surface cleanness and phenomenon of the oxidation color on the surface of the cold rolled strip steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009: 1-12.  
史晓强.冷轧带钢表面清洁度与氧化色现象的探讨[D].沈阳:东北大学,2009:1-12.
- [7] Lei Z L, Tian Z, Chen Y B. Laser cleaning technology in industrial fields[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030005.  
雷正龙,田泽,陈彦宾.工业领域的激光清洗技术[J].激光与光电子学进展,2018,55(3):030005.
- [8] Wang X D, Yu J, Mo Z Q, et al. Research progress on laser paint stripping technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050005.  
王晓东,余锦,莫泽强,等.激光脱漆技术的研究进展[J].激光与光电子学进展,2020,57(5):050005.
- [9] Fu F, Fu S C, Yuan H X, et al. Research progress of blade surface roughness of turbomachinery[J].

- Mining & Processing Equipment, 2015, 43(7): 1-5.  
付飞, 付双成, 袁惠新, 等. 叶轮机械叶片表面粗糙度的研究进展[J]. 矿山机械, 2015, 43(7): 1-5.
- [10] Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Parameters and surface performance of laser removal of rust layer on A3 steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 166(1): 10-16.
- [11] Shen Q, Tong Y Q, Ma G D, et al. Study on surface roughness of the substrate after laser derusting [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(6): 605-608.  
沈全, 佟艳群, 马桂殿, 等. 激光除锈后基体表面粗糙度的研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(6): 605-608.
- [12] Li X G, Huang T T, Chong A W, et al. Laser cleaning of steel structure surface for paint removal and repaint adhesion[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(3): 340-344.
- [13] Zhang G X, Hua X M, Li F, et al. Effect of laser cleaning process parameters on the surface roughness of 5754-grade aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(5/6): 2481-2490.
- [14] Liu H T, Li J C, Yang Y, et al. Automatic process parameters tuning and surface roughness estimation for laser cleaning[J]. IEEE Access, 2020, 8: 20904-20919.
- [15] Jia B S, Qu H X, Tang H P, et al. Laser cleaning technology of oxide layer on titanium rolled plate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 211401.  
贾宝申, 屈红星, 唐洪平, 等. 钛轧板表面氧化层激光清洗技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 211401.
- [16] Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Effect and mechanism of energy density on the aluminum alloy paint cleaned by laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131403.  
赵海朝, 乔玉林, 杜娴, 等. 能量密度对激光清洗铝合金漆层的影响及作用机理[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131403.
- [17] Li X Y, Li C Y, Wang D, et al. Effect of laser scanning speeds on cleaning quality of rusted layer on Q345 steel surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002010.  
李鑫炎, 李灿阳, 王丹, 等. 激光扫描速度对 Q345 钢表面锈层清洗质量的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002010.
- [18] Wang L H, Wang S Y, Cheng Y F, et al. Research on surface morphology and element distribution of aluminum alloy after laser cleaning[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(20): 102-106.  
王利华, 王少阳, 程银芬, 等. 铝合金激光清洗表面的形貌与元素分布研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(20): 102-106.
- [19] 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.
- [20] Yamashita T, Hayes P. Analysis of XPS spectra of Fe<sup>2+</sup> and Fe<sup>3+</sup> ions in oxide materials[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(8): 2441-2449.
- [21] Zhao Y. The surface modification and photoelectrocatalysis property research of hematite [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019: 21-32.  
赵勇.  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的表面改性及其光电催化性能的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2019: 21-32.
- [22] Qin Y. Thermal and mechanical effect during millisecond laser heating of metals[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012: 1-26.  
秦渊. 毫秒激光与金属材料相互作用中的热学和力学效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 1-26.
- [23] Bergström D, Powell J, Kaplan A F H. Absorptance of nonferrous alloys to Nd:YLF and Nd:YAG laser light at room temperature[J]. Applied Optics, 2007, 46(8): 1290-1301.