

引用格式: ZHA Rongwei, YU Lidong, LI Ben, et al. Laser Cleaning Process Monitoring of Metal Surface Based on Image Processing and LIPS Analysis[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7):0714001

查榕威,余立冬,李奔,等. 基于图像处理和LIPS分析的金属表面激光清洗过程监控[J].光子学报,2021,50(7):0714001

基于图像处理和LIPS分析的金属表面激光清洗过程监控

查榕威^{1,2,3},余立冬^{1,2,3},李奔^{1,2,3},白杨^{1,2,3}

(1 西北大学 光子学与光子技术研究所, 西安 710127)

(2 省部共建西部能源光子技术国家重点实验室, 西安 710127)

(3 陕西省全固态激光及应用工程技术研究中心, 西安 710127)

摘要:激光清洗过程监控是准确去除金属锈蚀层、有效避免金属基体损伤的关键。利用图像处理技术研究了 30 mm×30 mm 较大面积 Q235B 钢板在不同光斑搭接率下的清洗次数与清洗度的变化规律, 得到 50% 的最佳光斑搭接率。利用激光诱导等离子体光谱研究了 0.47 mm×0.47 mm 微小面积 Q235B 钢板的皮尔逊相关系数随清洗次数的变化趋势, 得到了不同厚度锈蚀层下的最佳清洗次数。在此基础上, 将图像处理法与 LIPS 分析法协同使用, 利用 LIPS 分析法能够根据微小面积锈蚀层厚度不同而动态校正最小清洗次数的特点, 弥补了图像处理法无法精确控制激光清洗过程的缺陷, 99.1% 的清洗度表明两种方法的协同使用可对 Q235B 钢板大面积激光清洗过程进行有效监控。

关键词:激光清洗; 锈蚀层; 激光诱导等离子体光谱; 图像处理; 过程监控

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215007.0714001

Laser Cleaning Process Monitoring of Metal Surface Based on Image Processing and LIPS Analysis

ZHA Rongwei^{1,2,3}, YU Lidong^{1,2,3}, LI Ben^{1,2,3}, BAI Yang^{1,2,3}

(1 Institute of Photonics & Photon-technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

(2 State Key Laboratory of Photon-technology in Western China Energy, Xi'an 710127, China)

(3 Shaanxi Engineering Technology Research Center for Solid State Lasers and Application, Xi'an 710127, China)

Abstract: Laser cleaning processing monitoring is essential to accurately remove the rust layer and effectively avoid the damages of the metal substrate. The variations between the number of cleaning and the rust cleaning rate at different spot overlap ratios on 30 mm×30 mm Q235B steel plate were studied by image processing to obtain the optimum spot overlap ratio of 50%. The changing trends of the Pearson correlation coefficient following the number of cleaning on 0.47 mm×0.47 mm Q235B steel plate were studied by Laser-induced Plasma Spectroscopy (LIPS) and the optimum number of cleaning was obtained under different thick dust layer. On this basis, the cooperation of image processing and LIPS is not only to dynamically correct the optimum number of cleaning but also to cover the shortage that image processing can not control the process of laser cleaning accurately. The results show that the cooperation of two methods can monitor the process of laser cleaning on a large area of Q235B steel plate and achieve high-

基金项目: 陕西省重点研发计划 (No. 2020GY-118), 陕西省教育厅服务地方专项计划 (No. 19JC040), 国家重点研发计划 (No. 2017YFB0405102)

第一作者: 查榕威 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光清洗在线监控技术研究。Email: zharongwei@stumail.nwu.edu.cn

导师 (通讯作者): 白杨 (1977—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为大功率激光器及应用技术。Email: by@nwu.edu.com

收稿日期: 2020-12-18; 录用日期: 2021-02-05

<http://www.photon.ac.cn>

quality laser cleaning with a 99.1% cleaning rate.

Key words: Laser cleaning; Rust layer; Laser-induced plasma spectroscopy; Image processing; Process control

OCIS Codes: 140.3390; 300.6365; 100.2000; 150.5795

0 引言

激光清洗技术是一种新型清洗技术,具有高质量、高效率 and 绿色环保等优点^[1-3]。在金属材料加工前,利用激光清洗技术去除金属材料表面锈蚀层,可大幅提高加工质量。然而,激光清洗参数设置不合适,将导致表面锈蚀层不能被完全去除,或者过度清洗导致金属基材被再次氧化。因此,为了获得较好的激光清洗效果,需要通过在线监测技术有效监控激光清洗过程。

目前,激光清洗在线监测技术主要集中于图像处理法^[4-6]和激光诱导等离子体光谱法(Laser-induced Plasma Spectroscopy, LIPS)^[7-9]。图像处理法能够直观地对大面积锈蚀层实施激光清洗作业后的在线监测。LIPS法对化学成分变化响应速度快,能够对微小面积锈蚀层实施激光清洗实时在线监测。然而,单一采用上述监测技术只能对激光清洗过程实施监测并对清洗之后的效果给出定量评估^[10,11],难以根据锈蚀层厚度不同而动态校正清洗次数,即难以完成激光清洗过程的实时控制^[12],从而获得最佳的激光清洗质量。

本文针对亟需解决的大面积金属表面锈蚀层激光清洗过程的实时监测和控制(监控)问题,搭建了一套基于图像处理法和LIPS分析法协同的激光清洗过程监控系统。选取Q235B钢板作为清洗对象,100 W、100 kHz、200 ns脉冲光纤激光器作为激光清洗光源。将图像处理法与LIPS分析法协同使用,首先由图像处理法获取激光清洗过程的最佳光斑搭接率,并将大面积锈蚀层划分为若干个微小面积单元;再由LIPS分析法逐一对每个锈蚀单元的激光清洗过程进行实时LIPS光谱强度监测以获取最大皮尔逊相关系数 γ ,并根据 γ 值大小而动态校正清洗次数,确保每个锈蚀单元均在最少清洗次数被清洗干净;最后由图像处理法计算清洗后的金属表面整体清洗度,从而完成对大面积金属表面锈蚀层激光清洗的实时过程监控。

1 实验条件和方法

1.1 实验材料制备

实验选取一批尺寸为30 mm×30 mm×1.5 mm的Q235B低碳钢作为样品,利用金相磨抛机去除表面锈蚀层,再使用丙酮擦拭、超声波清洗和烘干工艺,获得钢板样品表面基材。利用X射线能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS) (Phenom XL)测定基材的主要化学成分为(Fe: 98.01 wt%, O: 0.84 wt%, C: 1.15 wt%)。然后将钢板样品放置在盐雾机中,用3% NaCl溶液对钢板样品每天喷雾润湿1 h,总锈蚀时间为15天。测得锈蚀层的主要化学成分为Fe: 76.34 wt%, O: 22.51 wt%, C: 1.15 wt%。CCD相机拍摄的钢板样品表面锈蚀层的形貌如图1。如图1插图所示,采用光学显微镜(Olympus BXM-S)测得钢板样品切面三个测试点分别具有50 μm 、70 μm 和90 μm 三种不同锈蚀层厚度,表明钢板样品表面的锈蚀层厚度是不均匀的。

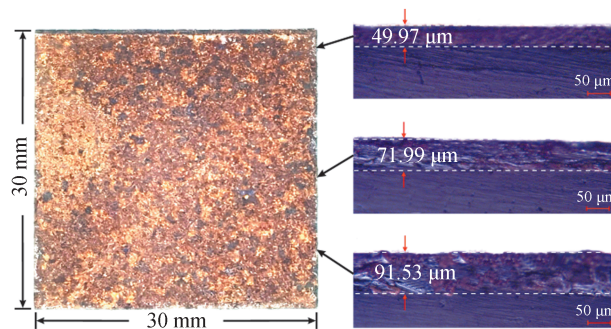


图1 钢板样品的表面锈蚀层照片。插图为锈蚀层切面200倍光学显微图像

Fig.1 Photo of rust layer on steel plate sample. The illustration shows the 200 times optical micrograph of the rust layer section

1.2 实验装置

激光清洗过程监控系统包括激光清洗部分和在线监控部分,如图2所示。激光清洗部分主要由1 064 nm脉冲光纤激光器、非偏振光隔离器、扫描振镜、聚焦透镜和三维平移台组成,表1为该部分主要性能参数。在线监控部分主要由计算机、同步信号发生器、CCD相机(500万像素)、光谱仪(Ocean HR4000 UV-NIR)和电动平移台组成。计算机控制同步信号发生器分别向激光器、光谱仪和扫描振镜各提供一路同步触发信号。清洗过程中激光与钢板样品表面作用时产生的LIPS光谱通过双凸透镜组会聚耦合进传输光纤,以增强光谱仪采集LIPS光谱信号的强度。激光清洗停止时,CCD相机通过电动平移台移动至样品上方,垂直拍摄清洗后的钢板样品表面。

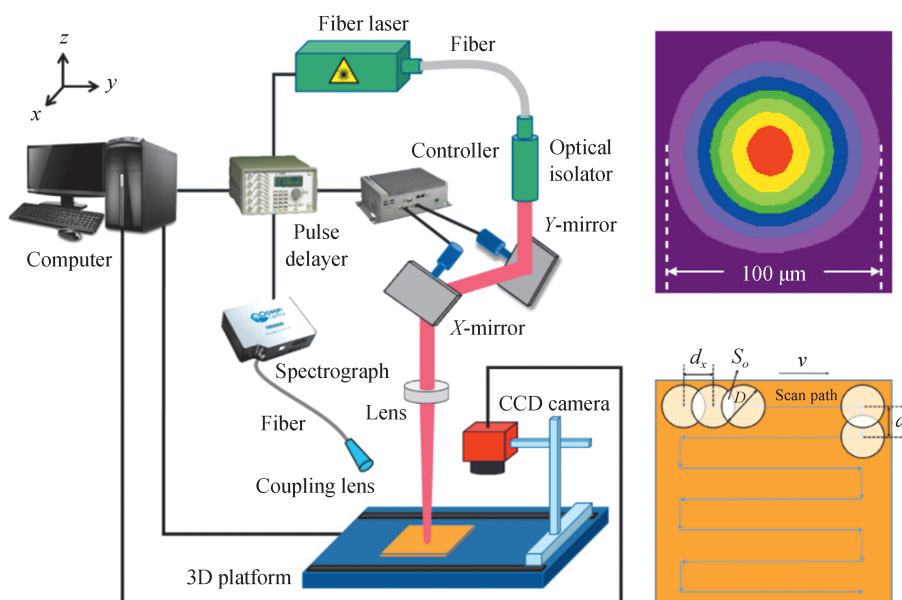


图2 激光清洗在线监控系统示意。插图为激光光束能量二维分布和激光清洗扫描路径

Fig. 2 Schematic of on-line monitoring system for laser cleaning. The illustrations are the 2D distribution of beam energy and the path diagram of laser cleaning

表1 激光清洗系统主要性能参数

Table 1 Performance parameters of laser cleaning system

| Parameter | Value |
|--|-------|
| Wavelength/nm | 1 064 |
| Laser average power/W | 100 |
| Laser pulse energy/mJ | 1 |
| Pulse width/ns | 200 |
| Maximum scanning speed/(mm·s ⁻¹) | 9 000 |
| Repetition frequency/kHz | 100 |
| Focused spot diameter/μm | 100 |
| Laser beam quality factor M^2 | < 2.0 |

光束质量分析仪(ModeScan1740)无功率衰减地测量出100 W激光束的光束质量因子为($M_x^2 = 1.74$, $M_y^2 = 1.76$)。如图2插图所示,被焦距为254 mm的透镜会聚后,激光束的焦斑直径 D 达到100 μm,其较好的2D高斯能量分布对称性说明该激光束接近于单横模。激光清洗路径为S型,如图2插图所示。

1.3 图像处理技术优化光斑搭接率

在激光清洗过程中,激光束在材料表面的光斑搭接率是一个重要工艺参数,光斑搭接率的大小将直接影响到材料表面的清洗质量。因此,要对激光清洗过程实施监控,获取最佳光斑搭接率显得尤为重要。相邻两个光斑的光斑搭接率计算式为^[13]

$$\sigma = \sigma_x = \sigma_y = \frac{4S_0}{\pi D^2} = 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{d_x}{D}\right) - \frac{2d_x \sqrt{D^2 - d_x^2}}{\pi D^2} \quad (1)$$

$$d_x = d_y = d = \frac{v}{f} \quad (2)$$

式中, σ_x 、 σ_y 分别是 X 方向和 Y 方向上的光斑搭接率, S_0 为两个相邻光斑的重叠面积, D 为聚焦后的光斑直径, d_x 、 d_y 分别是 X 方向和 Y 方向上相邻光斑的中心距离, f 为激光脉冲重复频率。通过控制振镜扫描速度 v 和 Y 方向光斑中心距离 d_y , 使 X 方向和 Y 方向的光斑搭接率相等 ($\sigma = \sigma_x = \sigma_y$)。

在激光脉冲重复频率 $f = 100$ kHz 时, 根据式 (1) 和 (2) 可计算出激光清洗通常使用的 40%、50% 和 60% 三种光斑搭接率对应的振镜扫描速率分别为 4 917 mm/s, 4 074 mm/s 和 3 197 mm/s。在光斑搭接率分别为 40%、50% 和 60% 条件下, 实验使用 100 W、100 kHz、200 ns 脉冲光纤激光对取同批次生长锈蚀层的三块钢板样品实施激光清洗作业。然后利用 Matlab 软件的 rgb2gray 函数对激光清洗后的钢材表面彩色图像做灰度处理。根据光学三原色原理, 设图像的灰度级分为 0, 1, ..., 255, 0 代表全黑, 255 代表全白。采用 Otsu 算法将灰度图像分割成未被去除的锈蚀 C_a 和钢板表面基材 C_b 两类像素群, 该算法以 C_a 像素群和 C_b 像素群加权平均像素值的类间方差 ζ^2 为准则计算分割阈值 $T^{[14]}$ 。其中, $C_a = [0, 1, \dots, T-1]$, $C_b = [T, T+1, \dots, 255]$ 。对于 C_a 或 C_b 像素群而言, 灰度为 i 的像素出现的权重为^[14]

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (3)$$

式中, n_i 为灰度为 i 的像素数目, $N = n_0 + n_1 + \dots + n_{255}$ 为总像素数。

当取某一分割阈值 T 时, 图像的灰度总平均值 μ , C_a 、 C_b 像素群的灰度加权平均值 μ_a 和 μ_b 分别为^[14]

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = \sum_{i=0}^{255} iP_i \\ \mu_a = \frac{\sum_{i=0}^{T-1} iP_i}{P_a} = \frac{\sum_{i=0}^{T-1} iP_i}{\sum_{i=0}^{T-1} P_i} \\ \mu_b = \frac{\sum_{i=T}^{255} iP_i}{P_b} = \frac{\sum_{i=T}^{255} iP_i}{1 - P_a} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中, P_a 和 P_b 分别为灰度在 C_a 、 C_b 像素群内的权重之和。

类间方差 ζ^2 的计算式为^[15]

$$\zeta^2 = P_a(\mu - \mu_a)^2 + P_b(\mu - \mu_b)^2 \quad (5)$$

通过追踪不同分割条件下的最大类间方差, 确定最佳分割阈值 T^* , 实现对 C_a 、 C_b 两类像素群的良好分割。最佳分割阈值 T^* 的表达式为^[15]

$$T^* = \arg \max(\zeta^2) \quad (6)$$

然后将灰度图像中坐标为 (x, y) 的像素点灰度值记为 $F(x, y)$, 采用 Otsu 算法对 $F(x, y)$ 进行二值化处理后的像素点灰度值记为 $G(x, y)$ 。灰度值 $F(x, y)$ 小于 T^* 值的像素点视为未被去除的锈蚀 (黑色), 大于等于 T^* 值的像素点视为钢板表面基材 (白色)。二值化方法为^[16]

$$G(x, y) = \begin{cases} 0 & F(x, y) < T^* \\ 255 & F(x, y) \geq T^* \end{cases} \quad (7)$$

清洗度 η 是评估激光清洗质量的重要参数之一^[17], 其计算式为

$$\eta = \frac{Q_c}{Q} \quad (8)$$

式中, Q 为使用 Matlab 软件的 numel 函数计算二值化处理图像的总像素点个数, Q_c 为采用 Matlab 软件的 sum 函数计算白色区域 (钢板表面基材) 的像素点个数。

在经过不同光斑搭接率的激光清洗后, 由图像处理法计算得到的清洗度 η 随清洗次数的变化规律如图 3

所示。当光斑搭接率分别为40%、50%和60%时,清洗度 η 分别在完成第6次、第4次和第3次激光清洗后达到91.2%、92.4%和91.5%的最大值。继续增加清洗次数,则 η 值出现下降趋势,故完成激光清洗的最少清洗次数 N_c 分别为6次、4次和3次。

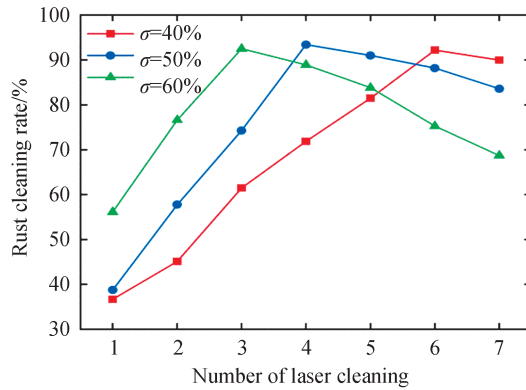


图3 不同光斑搭接率下清洗度随清洗次数的变化规律

Fig.3 Variation between the number of cleaning and the rust cleaning rate at different overlap ratios

清洗速率 U_s 为单位时间清洗的面积,是评估激光清洗效率的重要参数之一,其表达式为^[18]

$$U_s = \frac{S}{t} = \frac{v^2}{fN_c} \quad (9)$$

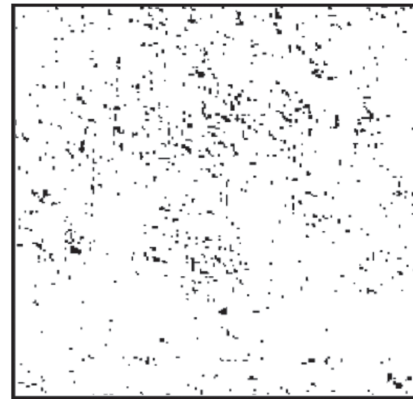
式中, S 为激光扫描过的样品表面面积, t 为清洗时间, v 为振镜扫描速率, N_c 为清洗度 η 达到90%时的最少清洗次数, f 为激光脉冲重复频率。

当激光脉冲重复频率 $f=100$ kHz时,将40%、50%和60%三种光斑搭接率对应的振镜扫描速率和图像处理法得到的对应最少清洗次数分别代入式(9),可计算出对应的激光清洗速率分别为 40.29 mm²/s、 41.49 mm²/s和 34.07 mm²/s。由此,选取其中清洗速率最高的50%光斑搭接率作为最佳光斑搭接率。

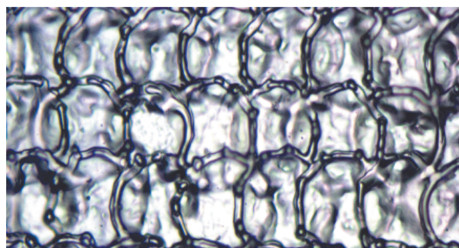
图4(a)和4(b)为50%最佳光斑搭接率下,经过第4次清洗的钢板样品表面照片及其二值化图像。可以看出,除大部分银白色区域为清洗干净区域外,还有小部分区域分别呈现出黄色、蓝色和红黑色,对应的500倍光学显微形貌图像如图4(c)~4(f)所示,四种颜色区域的EDS分析数据如表2所示。红黑色区域为未被



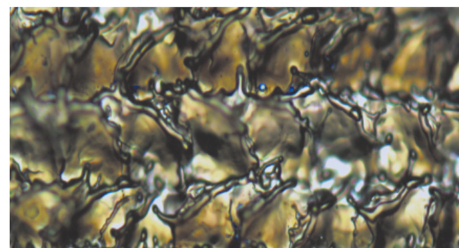
(a) Color photo



(b) Binarized photo



(c) Micrograph (500×) of argent area



(d) Micrograph (500×) of yellow area

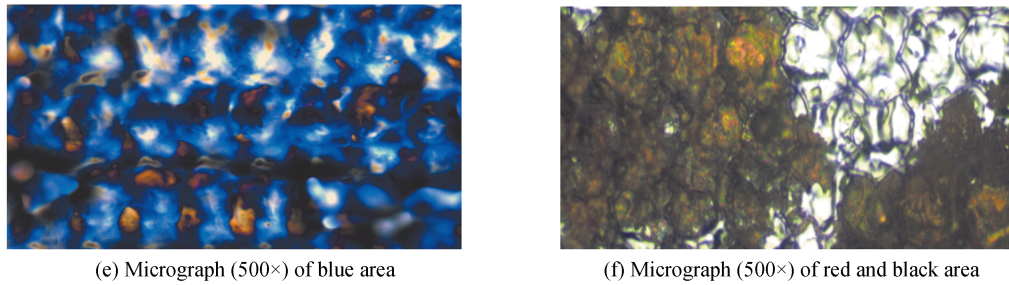


图4 激光清洗后的钢板样品表面宏观及微观图像
Fig.4 Macro and micro images of the steel plate sample surface after laser cleaning

表2 四种颜色区域的EDS分析数据
Table 2 EDS analysis of four different color areas

| | C/(wt%) | O/(wt%) | Fe/(wt%) |
|------------------|---------|---------|----------|
| Rust layer | 1.15 | 22.51 | 76.34 |
| Substrate | 1.15 | 0.84 | 98.01 |
| Argent area | 1.15 | 1.08 | 97.77 |
| Yellow area | 1.14 | 2.63 | 96.23 |
| Blue area | 1.14 | 6.47 | 92.39 |
| Red & black area | 1.15 | 14.31 | 84.54 |

清洗干净的锈蚀层 Fe_2O_3 , 黄色、蓝色区域分别为清洗干净区域再次受到激光热作用后产生的再次氧化物 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 ^[19, 20]。这说明即便在最佳光斑搭接率下, 采用固定清洗次数进行激光清洗, 不均匀的锈蚀层厚度仍会造成钢板样品表面一部分未被清洗干净或被过度清洗, 导致清洗度 η 无法趋近于 100%。因此, 仅在最佳光斑搭接率下并不能完全干净地去除锈蚀层, 还需要根据锈蚀层厚度的变化而动态调整激光清洗次数。

1.4 LIPS 分析法实时监测微小面积锈蚀层清洗

金属样板表面的锈蚀层厚度是随机分布的, 而 LIPS 法对化学成分变化响应速度快。因此对激光清洗锈蚀层微小面积时的 LIPS 光谱变化规律研究将有助于提高激光清洗过程监控对锈蚀层厚度变化的响应灵敏度。同步信号发生器发出两路 TTL5V 触发信号, 其中一路触发激光器产生脉冲重复频率为 f 的激光脉冲, 一个触发信号控制激光输出时间设定为 τ , 对应激光脉冲个数 n 的计算式为

$$n = f \times \tau \quad (10)$$

当 τ 设定为 1 ms 时, 由于激光诱导等离子体持续时间大约为十几至几十 μs , 因此 1 ms 的光谱仪积分设定时间远大于 LIPS 光谱持续时间, 可以认为实验利用光谱仪采集到的 LIPS 光谱表征了 1 ms 内脉冲重复频率 $f = 100 \text{ kHz}$ 的激光所激发的全部 LIPS 光谱。由式(10)可以计算得到激光脉冲个数 $n = 100$ 。将 50% 的最佳光斑搭接率和测量得到的 100 μm 激光聚焦直径 D 带入式(1), 可以计算出相邻光斑的中心距离 $d = 0.041 \text{ mm}$ 。在激光清洗路径上按照 $k \times k$ 个光斑排布的激光清洗微小面积 β 如式(11)所示, 实验按照 $n = 10 \times 10$ 个光斑排布获得的激光清洗微小面积 $\beta = 0.47 \text{ mm} \times 0.47 \text{ mm}$ 。

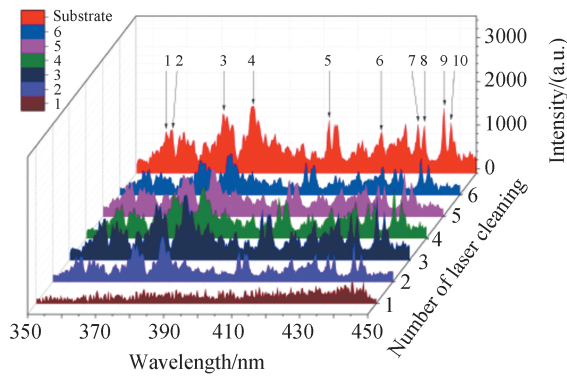
$$\beta = [(k-1) \times d + D] \times [(k-1) \times d + D] \quad (11)$$

同步信号发生器发出的另一路信号触发光谱仪采集 LIPS 光谱, 通过调节两路触发信号的延迟时间, 保证激发 LIPS 光谱与采集 LIPS 光谱之间同步。实验使用的 Ocean 光谱仪利用门模式工作的 ICCD 相机能够对 LIPS 光进行全谱实时采集和显示。虽然每个光谱信号是 1 ms 时间段内、一个微小面积 β 的 100 个激光点 LIPS 光谱积分平均值, 但是积分时间仅控制光谱强度, 具有探测速度快的优点。由于扫描振镜使激光点仅在一个微小面积 β 内移动, 当该单元清洗干净后, 电动平移台将钢板样品移动至下一个微小面积 β 的起始位置。因此, 相对于整个钢板样品和 254 mm 焦距而言, 微小面积 β 可近似为一个作用点, 可将其激光清洗的 LIPS 光谱探测视为实时过程^[8, 21]。首先, 在 Ar 气环境中对钢板样品表面基材进行 1 ms 激光清洗, 将采集到

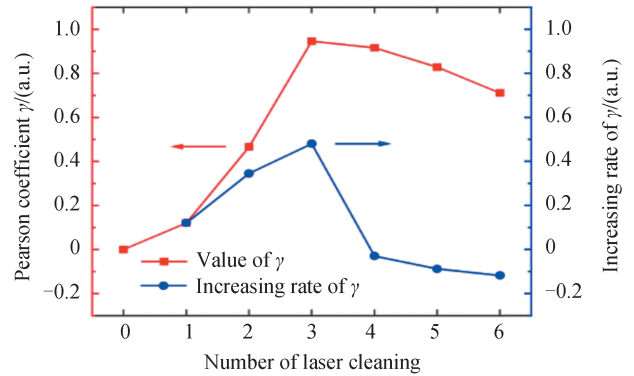
的LIPS光谱作为参考光谱。参考光谱中的线状光谱主要是铁原子所激发出来Fe I的特征谱线,如表3所示^[22]。然后,采用同一锈蚀层生长批次的钢板样品,对其边缘锈蚀层厚度分别为50 μm、70 μm和90 μm左右的三块微小面积进行激光清洗,图5(a)、(c)、(e)分别展示了不同锈蚀层厚度的LIPS光谱强度随清洗次数的变化规律。在分别经过第3次、第4次和第5次激光清洗后,三种不同锈蚀层厚度的LIPS光谱分别与LIPS参考光谱基本一致,说明锈蚀层被清洗干净。继续实施激光清洗,LIPS光谱强度出现不同程度衰减。原因是由于过度清洗生成的Fe₂O₃和Fe₃O₄一方面导致等离子体中Fe原子粒子数减少^[21],另一方面对激光的吸收强于Fe原子^[23],从而造成测得的Fe原子LIPS特征谱线强度降低,并且清洗次数越多,LIPS光谱强度衰减越大。

表3 钢板基材LIPS中Fe元素特征谱线
Table 3 Characteristic spectral lines of steel substrate in LIPS

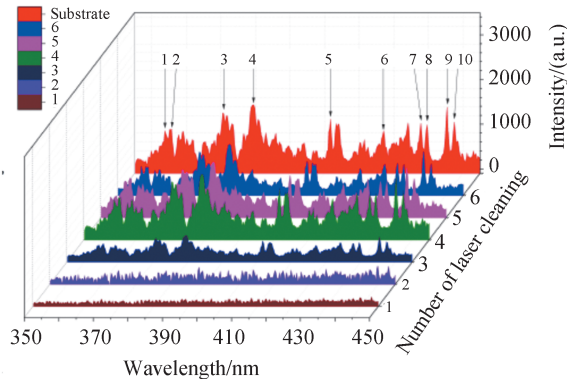
| Atom | Number of cleaning | Observed wavelength/nm | Standard wavelength/nm |
|------|--------------------|------------------------|------------------------|
| Fe I | 1 | 356.62 | 356.630 |
| Fe I | 2 | 358.47 | 358.478 |
| Fe I | 3 | 373.34 | 373.332 |
| Fe I | 4 | 382.11 | 382.119 |
| Fe I | 5 | 404.58 | 404.581 |
| Fe I | 6 | 419.90 | 419.909 |
| Fe I | 7 | 430.78 | 430.79 |
| Fe I | 8 | 432.55 | 432.576 |
| Fe I | 9 | 438.34 | 438.354 |
| Fe I | 10 | 440.45 | 440.475 |



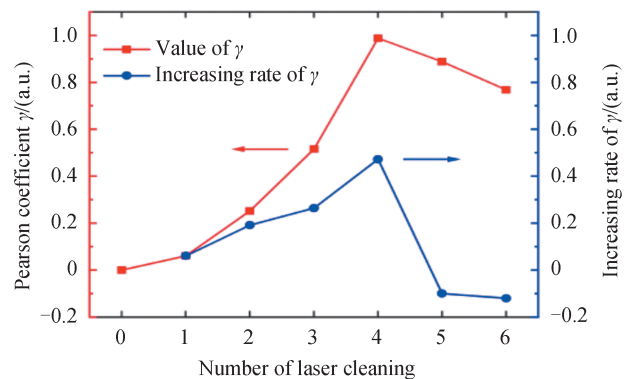
(a) LIPS spectrum of 50 μm



(b) γ value of 50 μm



(c) LIPS spectrum of 70 μm



(d) γ value of 70 μm

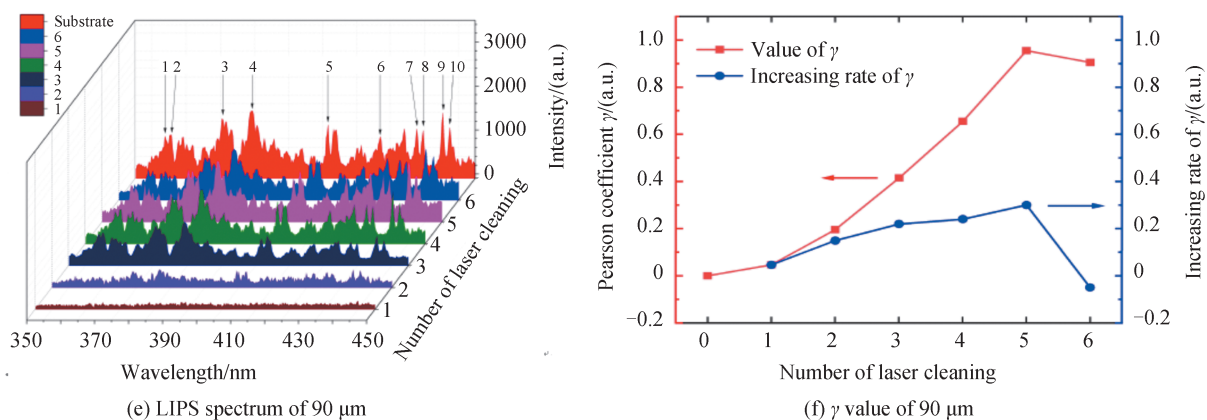


图5 不同锈蚀层厚度的LIPS光谱及对应的相关系数

Fig.5 Variation between the number of cleaning and LIBS at different rust layer and corresponding correlation coefficient γ

在统计学中,皮尔逊相关系数 γ 能够反映两个变量之间变化趋势的方向以及程度,其值介于-1与1之间^[24]。为更好分析微小面积锈蚀层不同厚度LIPS光谱强度随清洗次数的变化规律,实验利用皮尔逊相关系数 γ 对微小面积锈蚀层的LIPS光谱强度和钢板样品表面基材的LIPS参考光谱强度数据进行相似性对比分析,其中 $\gamma = 1$ 表示上述两组光谱强度数据的相关性为100%, $\gamma = 0$ 表示为无相关性, $\gamma = -1$ 表示两组光谱强度数据为-100%相关性。相关系数 γ 的计算式为^[25]

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - A)(b_i - B)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - A)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i - B)^2}} \quad (12)$$

式中,LIPS参考光谱为 a_i 数据集,清洗钢板样品表面锈蚀的LIPS光谱为 b_i 数据集, n 代表数据维数, A 是所有 a_i 数据的平均值, B 是所有 b_i 数据的平均值。

相关系数 γ 越高,说明当前清洗次数对应的LIPS光谱数据越接近于参考光谱数据,更能直接反映出激光清洗效果。根据相关系数 γ 的数值及其增长率,可以评估清洗不同厚度锈蚀层的最少清洗次数。图5(b)、(d)、(f)分别反映出图5(a)、(c)、(e)中LIPS光谱强度的 γ 值及其增长率随激光清洗次数的变化规律。可以看出,50 μm、70 μm和90 μm锈蚀层厚度分别对应3次、4次和5次清洗次数时,相关系数 γ 分别达到0.96、0.98和0.97最大数值,且 γ 的增长率达到最大值。由此可以判定出50 μm、70 μm和90 μm三种锈蚀层厚度的最少清洗次数分别为3次、4次和5次。激光清洗后通过EDS测试得到三种锈蚀层厚度所在钢板表面的氧含量分别为0.99%、0.91%和1.17%。上述结果表明,LIPS分析法的优点正是在激光清洗过程中能够根据锈蚀层不同厚度实时动态监测微小面积的清洗质量并校正最小清洗次数,从而弥补图像处理法无法根据锈蚀层厚度的变化改变清洗次数而精确控制激光清洗过程的缺陷。

2 激光清洗在线监控

上述研究结果表明,图像处理法能够为大面积激光清洗选取最佳光斑搭接率并给出整体清洗度,LIPS分析法能够根据微小面积锈蚀层不同厚度实时动态监测清洗质量并校正最小清洗次数。因此,实验将两种方法协同使用,达到对大面积激光清洗过程实施自动化监控的目的。实验采用Labview软件作为开发工具,通过计算机控制同步信号发生器、CCD相机、激光器、扫描振镜控制器和光谱仪,实现数据采集、坐标变换、数据运算等功能。具体流程如图6所示。首先,获得钢板样品基材表面的LIPS参考光谱;其次,取同批次生长锈蚀层的钢板样品表面做激光清洗初步实验,利用图像处理法获得50%最佳光斑搭接率并将其输入至扫描振镜控制器,以便控制扫描速率。第三步,对钢板样品的整体表面实施拍照,计算机根据0.47 mm×0.47 mm的面积将该图像划分成 M 个清洗单元并获取图像矢量数据。第四步,由计算机控制同步信号发生器分别向激光器、光谱仪和扫描振镜控制器各提供一路同步触发信号,一方面确保激光器输出的100个激光脉冲按照50%的光斑搭接率完整清洗一个清洗单元。另一方面光谱仪能够完整采集该清洗单元时产生的LIPS光谱强度,对比LIPS参考光谱,计算出相关系数 γ 值。若 $\gamma \geq 0.98$,则根据图像矢量数据将激光焦斑移动至下一

个清洗单元初始位置,并完成锈蚀层清洗和LIPS光谱强度监测;若 $\gamma < 0.98$,则激光焦斑将被移动至上一个清洗单元初始位置,继续完成该清洗单元的锈蚀层清洗和LIPS光谱强度监测,直至 $\gamma \geq 0.98$ 。第五步,当完成第 M 个清洗单元的锈蚀层清洗后,再次使用图像处理法对整个钢板样品表面进行分析,获取清洗度 η ,完成对整个钢板的清洗和评估。

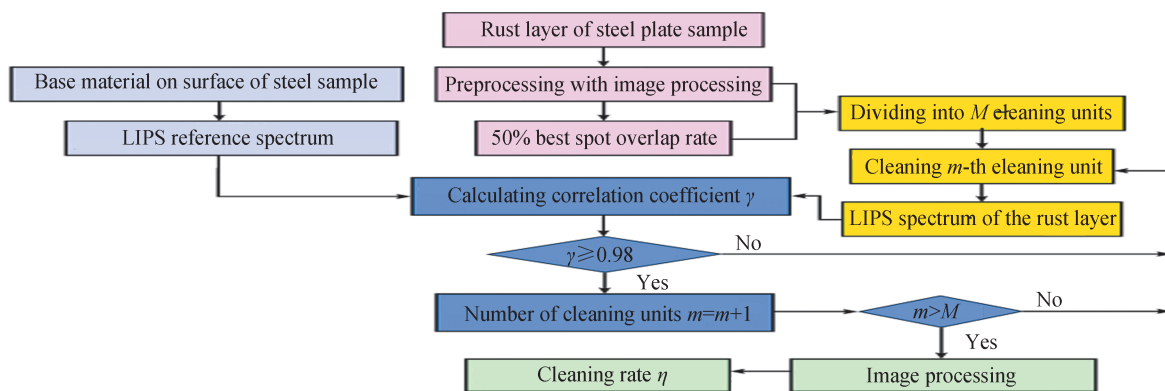


图6 图像处理与LIPS分析协同监控激光清洗过程的流程

Fig.6 Flow chart of laser cleaning process monitoring based on the cooperation of image processing and LIPS analysis

采用上述激光清洗过程监控系统对同一锈蚀层生长批次的钢板样品进行激光清洗,整个钢板样品的清洗度 η 达到99.1%,明显高于图像处理法92.4%的清洗度,清洗前后的照片以及清洗后的二值化图像如图7(a)~7(c)所示。对清洗后的钢板样品表面随机选取10个点进行EDS测试和粗糙度 R_a 测试。0.88%~1.15%的氧含量均接近于基材表面0.84%的氧含量,粗糙度 R_a 在1.32 μm 至1.54 μm 范围内变化。利用3D显微镜(HIROX RH2000)拍摄的钢板样品表面清洗前后同一位置附近的三维形貌如图7(d)和7(e)所示,由3D显微镜测得清洗后钢板样品表面的高度落差 $\Delta h = 40.9 \mu\text{m}$ 、粗糙度 $R_a = 1.45 \mu\text{m}$,明显小于清洗前90.0 μm 的高度落差和9.37的粗糙度。将单一监测技术与协同过程监控技术的功能与核心数据进行综合对比,如表4所示,相比单一监测方法,图像处理与LIPS分析协同的激光清洗过程监控兼顾了大面积金属表面锈蚀层

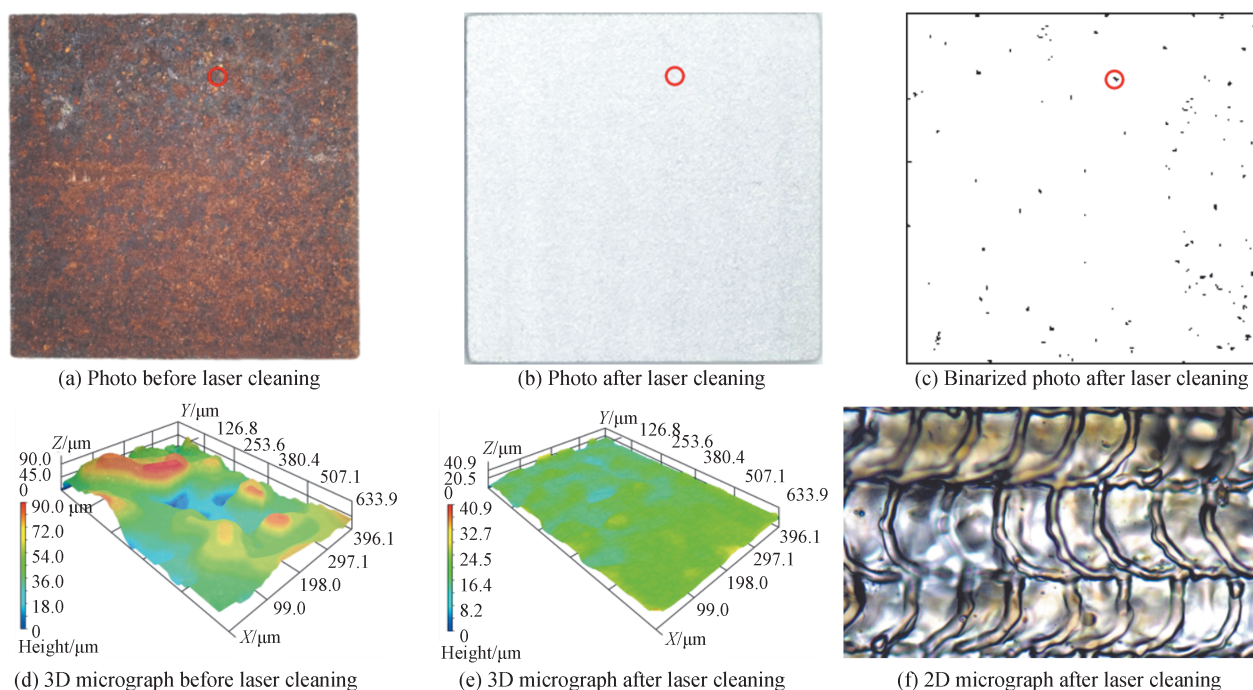


图7 基于过程监控方法的钢板样品表面激光清洗前后的宏观照片、微观三维、二维形貌图像

Fig.7 Macro photos, micro 3D, 2D topography images of the steel plate sample surface before and after laser cleaning based on the process monitoring method

表4 单一监测技术与协同监控技术应用下的激光清洗后核心数据对比
 Table 4 Data comparison between single monitoring and cooperative monitoring after laser cleaning

| Item | Image processing | LIPS analysis | Cooperative monitoring |
|-----------------------------------|------------------|---------------|------------------------|
| Area of monitoring | Big | Small | Big |
| Correcting the number of cleaning | No | Yes | Yes |
| Controlling process | No | Yes | Yes |
| Cleaning rate η | < 93% | / | > 98% |
| Oxygen content | 1.08%~14.34% | 0.99%~1.17% | 0.88%~1.15% |
| γ value | / | > 0.98 | > 0.98 |

激光清洗的监测功能和过程控制功能,可以获得高质量激光清洗效果。图7(f)为清洗后同一位置附近的500倍光学显微形貌图像。可以看出,仍有少部分的黄色 Fe_2O_3 。分析认为,计算机在评估某一清洗单元的相关系数 γ 值时,由于该单元大部分面积的 $\gamma < 0.98$,而小部分面积的 $\gamma \geq 0.98$,导致整体 $\gamma < 0.98$ 。激光不得不再次清洗该单元直至整体 $\gamma \geq 0.98$,小部分面积的锈蚀层被去除的同时基材被再次弱氧化。因此,后期可以根据清洗对象的需求,在保证光谱仪探测灵敏度的基础上,可以通过减小光谱仪积分时间,即减小清洗单元面积的方法来提提高计算机评估相关系数 γ 值的精确度,从而进一步提高整体清洗度。

3 结论

利用图像处理法研究了30 mm×30 mm大面积Q235B钢板锈蚀层的激光清洗度随光斑搭接率和清洗次数的变化规律,得到50%的最佳光斑搭接率。采用LIPS分析法研究了激光清洗0.47 mm×0.47 mm微小面积锈蚀层的皮尔逊相关系数随清洗次数的变化规律,得到不同锈蚀层厚度的最佳清洗次数。在此基础上,利用自行搭建的激光清洗过程监控系统对大面积金属表面锈蚀层进行图像预处理,由LIPS分析法逐一对每个微小面积锈蚀层激光清洗过程进行实时监控,最后由图像处理法对清洗后的大面积金属表面整体清洗质量进行评估,实现了清洗度达到99.1%的高质量自动化激光清洗。该方法解决了单一图像处理法或LIPS分析法只能对激光清洗过程进行监测而难以进行过程控制的难题,为大面积、高质量的自动化激光清洗提供了一种有效的过程监控方案。

参考文献

- [1] SHI T Y, WANG C M, MI G Y, et al. A study of microstructure and mechanical properties of aluminum alloy using laser cleaning [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42: 60-66.
- [2] LEI Zhenglong, TIAN Ze, CHEN Yanbin. Laser cleaning technology in industrial fields [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 60-72.
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): 60-72.
- [3] MA Yushan, WANG Xinlin, HE Tao, et al. Research progress in dry laser cleaning on corrosion and coating layers of metal surfaces [J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 124-134.
马玉山, 王鑫林, 何涛, 等. 金属表面腐蚀层及涂层的激光干式清洗研究进展 [J]. 表面技术, 2020, 49(2): 124-134.
- [4] SHI Tianyi, ZHOU Longzao, WANG Chunming, et al. Machine vision-based real-time monitor system for laser cleaning aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 75-81.
史天意, 周龙早, 王春明, 等. 基于机器视觉的铝合金激光清洗实时检测系统 [J]. 中国激光, 2019, 46(4): 75-81.
- [5] GUO Jichang, ZHU Zhiming, YU Yingfei, et al. Research and application of visual sensing technology based on laser structured light in welding industry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1-10.
郭吉昌, 朱志明, 于英飞, 等. 焊接领域激光结构光视觉传感技术的研究及应用 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1-10.
- [6] HUANG W, KOVACEVIC R. Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(1-4): 235-248.
- [7] 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.
- [8] YAO Hongbing, YU Wenlong, LI Yaru, et al. Analysis of laser cleaning of iron in air based on characteristics of plasma spectra. [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(11): 1295-1299.
姚红兵, 于文龙, 李亚茹, 等. 基于等离子体光谱特征的空气中激光铁块清洗的研究 [J]. 光子学报, 2013, 42(11): 1295-1299.
- [9] TONG Yanqun, ZHANG Ang, FU Yonghong, et al. Research on online detection of plasma spectroscopy in laser cleaning

- of the carbon fiber reinforced polymer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(8): 2388-2394.
- 佟艳群,张昂,符永宏,等. 碳纤维复合材料的激光清洗等离子体光谱在线检测研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(8): 2388-2394.
- [10] QI L, ZHANG Y, WANG S, et al. Laser cutting of irregular shape object based on stereo vision laser galvanometric scanning system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 68: 180-187.
- [11] CHEN Yiming, ZHOU Longzao, YAN Fei, et al. Mechanism and quality evaluation of laser cleaning of aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 81-88.
- 陈一鸣,周龙早,闫飞,等. 铝合金激光清洗机理与质量评估 [J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 81-88.
- [12] LÓPEZ A J, LAMAS J, POZO-ANTONIO J S, et al. Development of processing strategies for 3D controlled laser ablation: Application to the cleaning of stonework surfaces [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 126: 105897.
- [13] BAI Y, LEI G Z, CHEN H W, et al. Incoherent space beam combining of fiber-transmitted semiconductor lasers for oil well laser perforation [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 154457-154465.
- [14] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 2007, 9(1): 62-66.
- [15] LI X D, YANG X J, ZHOU L H, et al. Adaptive threshold estimation of open set voiceprint recognition based on otsu and deep learning [J]. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2020, 8(11): 2671-2682.
- [16] SUN Guodong, XU Yun, XU Liang, et al. Binarization method of instrument image with uneven illumination and ghosting [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 74-78.
- 孙国栋,徐昀,徐亮,等. 不均匀光照和重影的仪表图像二值化方法 [J]. *应用光学*, 2020, 41(1): 74-78.
- [17] GUO Zhaoheng, ZHOU Jianzhong, MENG Xiankai, et al. Nanosecond pulsed laser paint stripping of HT250 gray cast iron [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 191-197.
- 郭召恒,周建忠,孟宪凯,等. HT250灰铸铁纳秒脉冲激光除漆工艺研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 191-197.
- [18] ZHOU C, LI H G, CHEN G Y, et al. Effect of single pulsed picosecond and 100 nanosecond laser cleaning on surface morphology and welding quality of aluminium alloy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 127: 1-9.
- [19] ISSARTEL C, BUSCAIL H, WANG Y. et al. Water vapour effect on ferritic 4509 steel oxidation between 800 and 1000 °C [J]. *Oxidation of Metals*, 2011, 76: 127-174.
- [20] ZHU H, CAO F, ZUO D, et al. A new hydrothermal blackening technology for Fe₃O₄ coatings of carbon steel [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(18): 5905-5909.
- [21] YANG Xue, ZHANG Dan, CHEN Anmin, et al. Influence of distance between focusing lens and sample surface on atomic line and ionic line intensities of laser-induced silicon plasmas [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 308-313.
- 杨雪,张丹,陈安民,等. 聚焦透镜到样品表面的距离对激光诱导硅等离子体原子谱线强度和离子谱线强度的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 308-313.
- [22] KRAMIDA A, RALCHENKO Y, READER J, et al. NIST Atomic Spectra Database (version 5.8) [DB/OL]. Available, <http://physics.nist.gov/asd>.
- [23] WANG Guibing, LUO Fei, LIU Cangli, et al. Reflectance change of 45° steel irradiated by laser in atmosphere [J]. *High Power Laser and Particle beams*, 2006, 18(2): 181-183.
- 王贵兵,罗飞,刘仓理. 大气环境下重复频率激光辐照45°钢反射率变化分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(2): 181-183.
- [24] CHEN Bin, WU Hongyang, HAN Chao, et al. Study on trace water influence on electrical properties of insulating oil based on the mid-infrared spectrum analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(10): 2740-2745.
- 陈彬,武宏阳,韩超,等. 基于中红外光谱分析的微水对绝缘油电气性能影响研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(10): 2740-2745.
- [25] XIANG Yang, WANG Shibo, GE Shirong, et al. Study on near-infrared spectrum features and identification methods of typical coal-rock in dust environment [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(11): 3430-3437.
- 向阳,王世博,葛世荣,等. 粉尘环境下典型煤岩近红外光谱特征及识别方法 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(11): 3430-3437.