

激光扫描速度对 Q345 钢表面锈层 清洗质量的影响

李鑫炎¹, 李灿阳¹, 王丹^{1*}, 雷玉成¹, 李猛刚², 黄巍²

¹江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013;

²苏州德威尔光电技术有限公司, 江苏 苏州 215000

摘要 采用波长为 1064 nm 的光纤激光器对 Q345 钢表面锈层进行激光清洗, 研究了激光扫描速度对清洗质量的影响。结果表明: 当扫描速度小于 $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 激光对基体的损伤较大; 当扫描速度达到 $5000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 部分锈蚀仍残留于材料表面; 当扫描速度为 $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 清洗效果较好且基体不会受到损伤。随着扫描速度从 $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $6000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 清洗后 Q345 钢表面的铁含量呈现先增加后降低的趋势, 而氧含量则是先降低再升高。当扫描速度为 $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, Q345 钢表面清洗后铁元素的质量分数达到了峰值, 约为 90%, 氧元素的质量分数则达到谷值, 约为 7%; 铁与氧的化合物较少, 且钢的表面粗糙度亦较低, $R_a \approx 6.9 \mu\text{m}$ 。通过调节扫描速度可以获得较好的激光清洗效果; 激光清洗后, Q345 钢表面的电化学腐蚀性能有所提高。

关键词 激光技术; 激光清洗; 锈层; 扫描速度; 元素分布; 铁与氧的化合物; 表面粗糙度

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1002010

Effect of Laser Scanning Speeds on Cleaning Quality of Rusted Layer on Q345 Steel Surface

Li Xinyan¹, Li Canary¹, Wang Dan^{1*}, Lei Yucheng¹, Li Menggang², Huang Wei²

¹School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

²Suzhou Dvellk Photo-Electricity Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000, China

Abstract A fiber laser with a wavelength of 1064 nm was used for laser cleaning of the rusted layer on Q345 steel surface, and the effect of laser scanning speed on the cleaning quality was studied. The results show that when the scanning speed is smaller than $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, the laser significantly damages the substrate; when the scanning speed reaches $5000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, some rust remains on the material's surface; when the scanning speed is $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, the cleaning effect is better and the substrate will not be damaged. As the speed increases from $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ to $6000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, the Fe content on the Q345 steel surface after cleaning shows a tendency of increasing firstly and then decreasing, while the O content decreases firstly and then increases. When the scanning speed is $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, the Fe element content on the Q345 steel surface reaches a peak of about 90%, the O element content reaches a valley value of about 7%, the compounds of Fe and O are also less and the surface roughness ($R_a \approx 6.9 \mu\text{m}$) of the steel is also low. Good laser cleaning effect can be obtained by adjusting the scanning speed appropriately. After laser cleaning, the electrochemical corrosion performance of Q345 steel surface can be enhanced.

Key words laser technology; laser cleaning; rusted layer; scanning speed; element distribution; Fe and O compound; surface roughness

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 140.3538

收稿日期: 2020-04-26; 修回日期: 2020-05-27; 录用日期: 2020-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(51705219)、江苏省绿色船舶技术重点实验室基金(2019Z11)、江苏大学高级人才科研启动基金(17JDG039)、江苏大学学生科研项目(18A009)

* E-mail: wdd_wan@163.com

1 引 言

Q345 结构钢不仅具有良好的韧性、抗压、抗拉等力学性能^[1], 还具有良好的焊接性能, 在船舶、桥梁、铁路及油气管道等行业中被广泛应用。众所周知, 此类材料在生产制造及使用过程中会产生锈蚀等缺陷, 即便表面喷漆可以起到保护作用, 但材料在长期服役过程中难免会产生漆层脱落等现象, 同样会使其表面暴露于大气或潮湿的工作环境中而发生锈蚀, 降低材料的性能并影响使用寿命。因此, 为了保证材料的使用性能及寿命, 需要及时对锈蚀部位进行除锈处理。目前, 常用的清洗锈蚀的方式有酸洗^[2]、机械打磨^[3]和喷砂^[4]等。其中: 酸洗会使钢材表面发生腐蚀, 且易引发氢脆, 降低钢的韧性^[2], 同时还会造成环境污染; 机械打磨的投资较高, 需要一定的设备、工作场地和成型磨轮, 且打磨出的线条光度不高, 会产生磨痕; 喷砂则会产生大量灰尘, 清洗后若下雨易发生反锈, 对钢材表面结构造成损伤。针对上述情况, 一种新型的激光清洗技术应运而生。

激光清洗技术是一种高效、绿色的清洗方法。该方法先将高亮度和方向性好的连续或脉冲激光整形成具有特定能量分布和光斑形状的激光束^[5], 然后用整形后的激光束照射待清洗部位, 使附着的污染物吸收激光能量后发生一系列复杂的物理化学反应(包括振动、熔化、燃烧、气化等), 最终使污染物脱离材料表面, 且不对基体造成损坏^[6]。激光清洗技术具有精度高、清洗效果好、应用范围广、非接触式、可以实现半自动或全自动化清洗等特点, 是 21 世纪最具潜力的绿色清洗技术^[7]。

Ke 等^[8]证实了利用 CO₂ 脉冲激光去除船舰表面锈蚀的可行性和有效性, 他们在实验中发现, 在不损伤基板的前提下, 控制激光功率密度可有效清除

铁锈。邱兆飙等^[9]采用波长为 1.06 μm 的脉冲激光研究了脉冲频率与扫描速度等工艺参数对锈蚀层清洗效果的影响, 结果表明, 采用高低脉冲频率并交替使用快慢扫描速度重复多次扫描更有利于去除锈层。王凯杰^[10]观察了 Q235 碳钢脉冲激光除锈过程汇总图像与温度的变化, 并对单个亮斑能量分布与尺寸进行了研究, 结果发现, 亮斑尺寸与能量密度相关, 即能量密度越大, 亮斑越大, 清除的锈蚀层厚度也越大。解宇飞等^[11]针对船舶板材表面除锈工艺的需求, 提出了一种通过单线扫描沟槽轮廓特征确定搭接扫描除锈工艺参数的方法。

上述研究主要集中于激光能量对除锈效果的影响上, 而关于定量分析激光扫描速度对激光清洗效果影响的研究还比较少。鉴于此, 本文采用光纤激光器对 Q345 钢表面进行激光清洗, 定量分析了扫描速度对激光除锈后材料表面形貌、元素分布、物相成分及表面粗糙度的影响, 探索了激光清洗之后材料表面电化学腐蚀性能的变化规律。

2 试验方法

图 1 展示的是激光清洗试验装置系统。该系统主要由 200 W MOPA (master oscillator power amplifier) 脉冲光纤激光器、手持激光清洗枪、自动化台架、电气控制箱及传输系统构成, 可实现自动化定量清洗。在清洗过程中, 激光器发射出的脉冲激光经过传输系统进入手持激光清洗枪, 枪内系统可使激光变为平行光束, 光束经由振镜系统反射后聚焦照射到污染物表面, 通过调节振镜进行 X 方向的摆动即可完成激光扫描动作; 同时, 清洗枪置于自动化台架之上, 清洗枪沿 Y 方向运动进行清洗作业, 如图 1(b) 所示。图 1(b) 中的 X 方向为激光扫描速度的方向, Y 方向为激光清洗速度的方向。

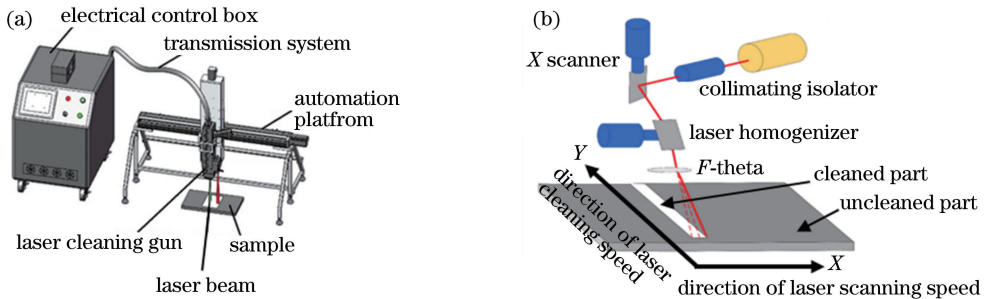


图 1 激光清洗平台系统^[12]。(a) 自动化激光清洗设备; (b) 清洗作业示意图

Fig. 1 Laser cleaning platform system^[12]. (a) Automatic laser cleaning equipment;

(b) schematic of cleaning operation

实验用激光器发射激光的波长为 1064 nm, 激光器的平均额定功率为 200 W, 激光器入射光斑的直径为 0.6 mm, 经过场镜聚焦到材料表面的光斑直径约为 0.04 mm, 单脉冲能量为 2 mJ. 激光清洗时的主要工艺参数如表 1 所示。

表 1 激光清洗工艺主要参数

Table 1 Main parameters of laser cleaning process

Laser main parameter	Value
Wavelength /nm	1064
Scanning speed /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000
Average rated power /W	200
Repetition rate /kHz	100
Pulse width /ns	400
Spot size /mm	0.6

清洗后利用体视显微镜和扫描电子显微镜 (SEM) 进行微观形貌观察; 采用 X 射线能谱仪 (EDS) 测定清洗前后材料表面的元素分布; 利用 X

射线衍射仪 (XRD) 进行物相分析; 采用激光共聚焦显微镜进行三维形貌表征与表面粗糙度的测量; 采用电化学工作站测定试样清洗前后的耐蚀性。采用三电极恒电位法测试极化曲线, 其中参比电极为饱和甘汞电极, 辅助电极为铂电极, 工作电极为测试试样。设置电化学工作站的扫描电压范围为 $-1.6 \sim 0.3 \text{ V}$, 扫描速度为 $1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$, 采样频率为 1.0 Hz 。

3 试验结果与讨论

3.1 材料表面形貌

Q345 钢表面的锈蚀是自然状态下形成的, 如图 2 所示。图 2(a) 为 Q345 钢表面锈层的宏观形貌, 可见, 大量凹凸不平的棕色金属氧化物分布于基体之上。通过 XRD 分析后可知锈层的主要成分为 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 , 如图 2(c) 所示。图 2(b) 是 Q345 钢表面锈层的微观形貌图, 可见, 锈层结构疏松, 内部存在许多缝隙和细小的孔洞, 且锈层多从表面向孔洞内生长^[13]。

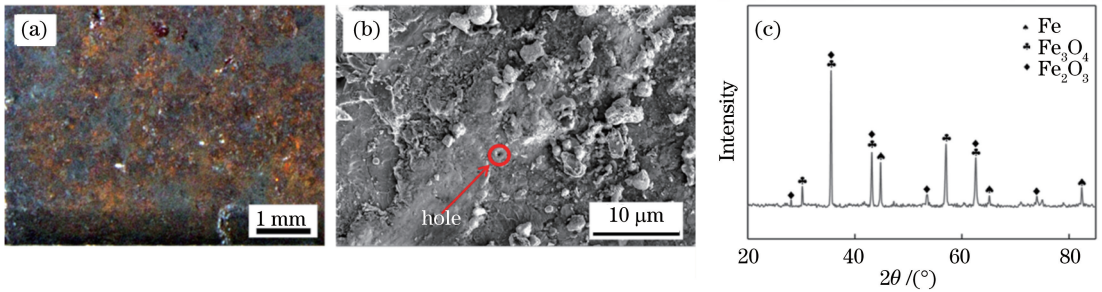


图 2 Q345 钢表面锈层的表面形貌与物相。(a) 宏观形貌; (b) SEM 形貌; (c) XRD 谱

Fig. 2 Surface morphology and phase of rusted layer on Q345 steel surface. (a) Macroscopic morphology; (b) SEM morphology; (c) XRD spectrum

图 3 展示的是激光扫描速度对 Q345 钢锈层表面形貌的影响。图 3(a) 为 Q345 钢锈层的宏观形貌, 可以看到锈层分布不均匀, 且有黄色锈迹。图 3(b)~(d) 展示了激光清洗锈层后的宏观形貌, 可见: 当扫描速度为 $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 材料表面出现了明显的纵向沟壑, 部分区域出现熔化烧蚀, 清洗效果不佳; 当扫描速度达到 $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 后, 纵向沟壑痕迹减少, 基体表面大部分露出, 说明清洗效果较好, 但仍有少量部分锈层残留, 这可能与锈层本身不均匀有关; 随着扫描速度进一步增大, 清洗效果变差, 如图 3(d) 所示 (扫描速度提升至 $5000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 锈层面积有所增加, 证实了清洗效果呈现下降趋势)。王欢等^[14] 指出, 在激光作用时间较短的条件下, 锈层会发生熔化但并不脱离表面的现象, 导致基体又与锈层结合在一起, 不利于高效清洗。

图 4 为激光扫描速度对 Q345 钢锈层 SEM 形

貌的影响, 且图 4 的 SEM 图片与图 3 的宏观形貌图片一一对应。图 4(a) 中的白色区域为锈层, 大量的白色锈层分布于基体之上, 说明此时锈层较多。当激光扫描速度为 $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 光斑留下的痕迹比较明显, 沟壑较深, 如图 3(b) 和图 4(b) 所示。随着扫描速度增大, 光斑作用效果有所减弱^[15], 沟壑较浅, 如图 4(c) 所示, 说明在该条件下 (扫描速度为 $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) 锈层清除得较为彻底, 且对基体的损伤也较小。图 4(d) 中右侧呈现出了部分锈层残留在基体表面的现象, 清洗效果不明显。当扫描速度过小时, 激光对基体的损伤较大; 当扫描速度过大时, 单位时间内光斑的作用时间缩短, 材料表面锈层吸收的能量较少, 锈层只发生弹性膨胀, 并未达到烧蚀温度, 以至于仅发生熔化而未发生气化相变^[11], 因此锈层依然附着于基体之上, 清洗效果不佳。

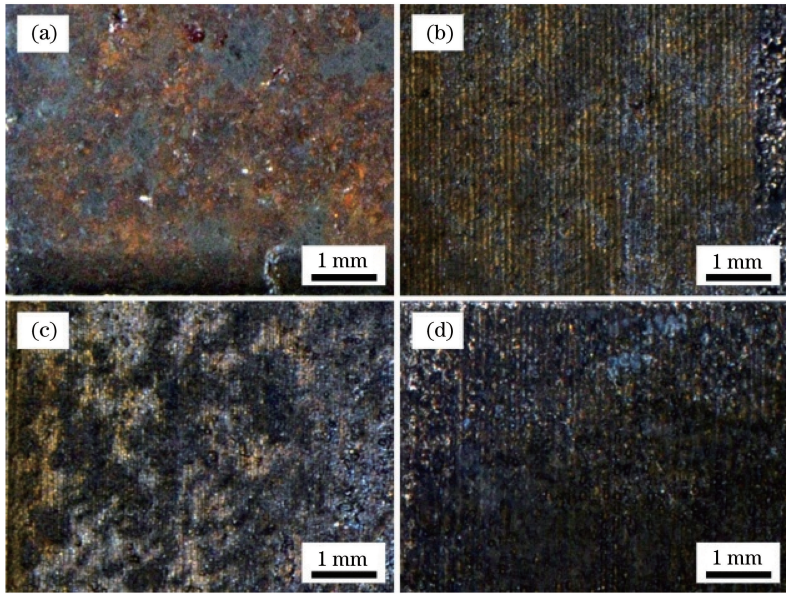


图 3 激光扫描速度对 Q345 钢锈层宏观表面形貌的影响。(a) 0(未清洗);(b) $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$;
(c) $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$;(d) $5000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 3 Effect of laser scanning speed on the macroscopic surface morphology of rusted layer on Q345 steel.
(a) 0 (not cleaned); (b) $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $5000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

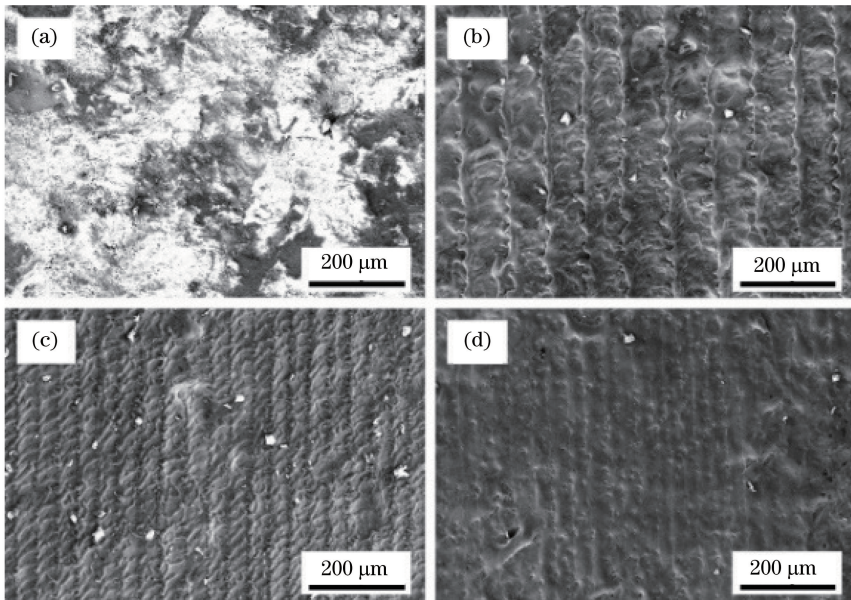


图 4 激光扫描速度对 Q345 钢锈层微观表面形貌的影响。(a) 0(未清洗);(b) $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$;
(c) $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$;(d) $5000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 4 Effect of laser scanning speed on the micro surface morphology of rusted layer on Q345 steel.
(a) 0 (not cleaned); (b) $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $5000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

激光清洗是通过激光光斑依次搭接之后作用于基体之上工作的。图 5 为激光清洗过程中光斑搭接示意图,其中: d_1 为光斑搭接宽度,主要由扫描速度决定; d_2 为线搭接宽度,由清洗速度和扫描速度共同决定。

图 6 为激光单道清洗时(清洗速度为 0),不同

扫描速度下光斑对材料表面形貌的影响。图 6 中的 Q345 钢在激光清洗前经过了抛光处理,图 6(a)是扫描速度为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时激光清洗后材料表面留下的光斑痕迹,图 6(b)是扫描速度为 $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时材料表面留下的光斑痕迹。通过对比可以发现,扫描速度越高,激光作用区域越小^[16]。在图 6(a)中

可以看到光斑作用区域中心有约 $40\ \mu\text{m}$ 宽的深色带状痕迹。试验用激光光源符合高斯分布, 聚焦光斑直径约为 $40\ \mu\text{m}$, 因此该带状痕迹为光斑中心搭

接扫描后留下的。这是因为扫描速度较低时, 激光作用在材料表面的时间延长, 使得材料表面吸收了较多能量, 达到了熔化及相变所需的温度^[10]。

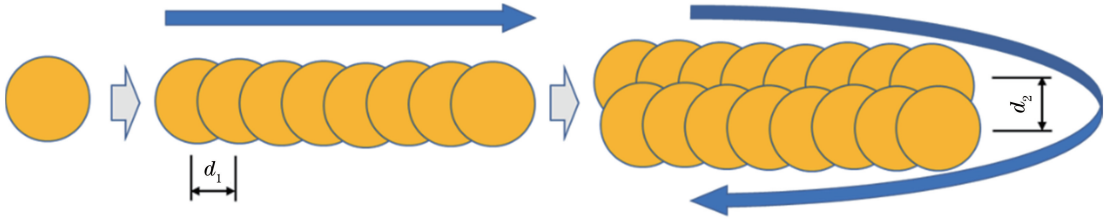


图 5 激光清洗光斑搭接示意图

Fig. 5 Schematic of spot lapping during laser cleaning

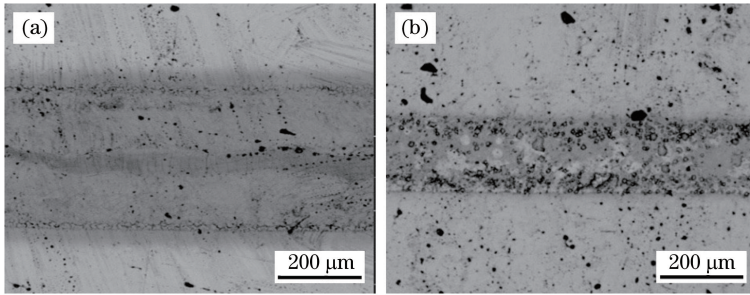


图 6 激光单道清洗(清洗速度为 0)时不同扫描速度下的光斑作用效果图。(a) $100\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $1000\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 6 SEM of spot effect at different scanning speeds and cleaning speed of 0 during laser single-pass cleaning.

(a) $100\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $1000\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

由图 7 可知, 当清洗速度为 $10\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $1000, 3000, 5000\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速度下的线搭接宽度 d_2 分别为 $88.4, 40.9, 30.2\ \mu\text{m}$ 。即: 当清洗速度一定时, 线搭接宽度 d_2 随着扫描速度的增大而降低。在清洗过程中, 假设激光光斑的扫描方向为 X 轴, 激光清洗方向为 Y 轴, 如图 1(b) 所示。清洗时光斑轨迹受到 X、Y 两个方向的作用, 保持 Y 方向的清洗速度为 $10\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 随着 X 方向的扫描速度增大, 单位时间内的光斑重叠率减小, 光斑作用时间缩短, 材料表面吸收的能量减少, 达不到化学变化所

需的温度, 不能起到清洗的效果。因此在清洗过程中, 扫描速度过小会导致基体受到损伤, 过大则会导致清洗效果变差。

3.2 元素分布

图 8 展示的是激光扫描速度对 Q345 钢表面元素分布的影响。对比铁元素的分布可以发现: 未清洗时锈层中的铁元素分布得较稀疏, 如图 8(a) 所示; 当激光扫描速度为 $1000\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 材料表面铁元素的分布开始变得密集, 且呈带状分布, 说明清洗起到了一定效果, 如图 8(b) 所示; 当扫描速度进一步增大时, 大量铁元素均匀地分布于材料表面, 如图 8(c)、(d) 所示。对比氧元素的分布可以明显发现, 当激光扫描速度为 $3000\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 氧元素的分布最为稀疏, 如图 8(g) 所示, 说明此时氧含量整体下降较多; 当扫描速度为 $5000\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 氧元素均匀、密集地分布, 说明此时的氧含量较高。

图 9 为激光扫描速度对 Q345 钢表面元素含量的影响, 可见, 随着扫描速度增大, 铁元素含量呈现先升高后降低的趋势, 而氧元素含量则先降低后升高: 当扫描速度从 $500\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大至 $3000\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 铁元素的质量分数从 82% 达到峰值(约 90%); 同时, 氧元素的质量分数从 13% 下降到最低值(约 7%); 当

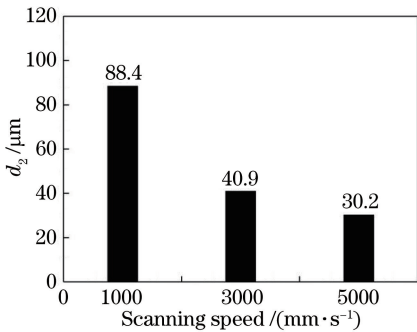


图 7 清洗速度为 $10\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时扫描速度对线搭接宽度 d_2 的影响

Fig. 7 Effect of scanning speed on line with d_2 at cleaning speed of $10\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ during laser cleaning

扫描速度从 $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 提升至 $4000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,铁元素质量分数从峰值下降至 80% ,而氧元素质量分

数则从谷值升高至 16% 。进一步增加扫描速度后,铁和氧元素含量趋于平稳。

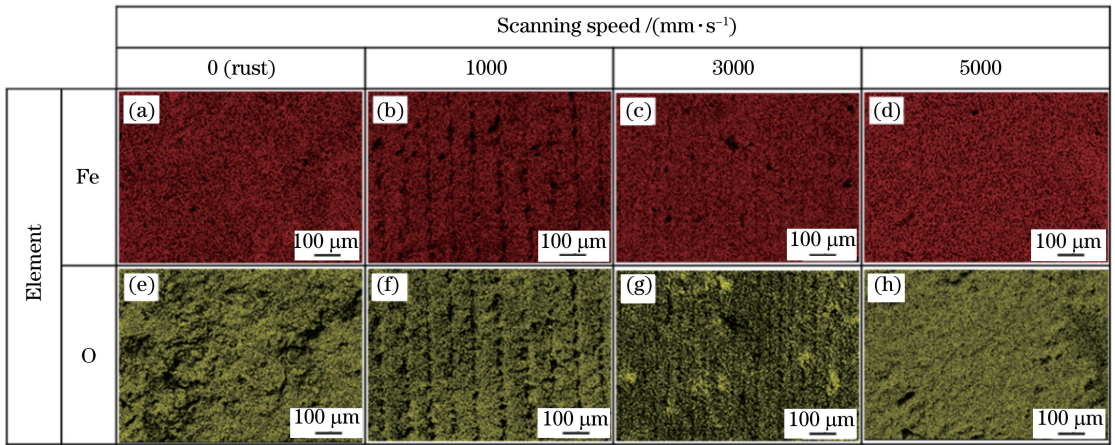


图 8 激光扫描速度对 Q345 钢表面元素分布的影响

Fig. 8 Effect of laser scanning speed on element distribution of Q345 steel surface during laser cleaning

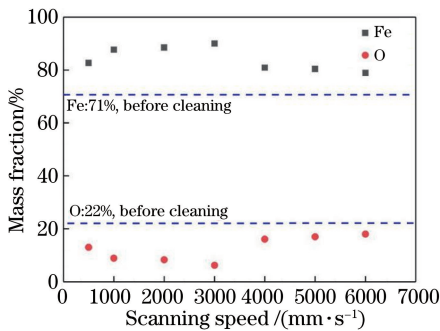


图 9 激光扫描速度对 Q345 钢表面元素含量的影响

Fig. 9 Effect of laser scanning speed on element content of Q345 steel surface during laser cleaning

锈层主要为铁与氧的化合物(如 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 等),如图 2(c)所示。当材料表面的氧含量较低时,说明清洗效果较好。随着扫描速度从 $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 上升到 $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,氧含量呈下降的趋势,说明锈蚀物质已脱离基体表面,清洗效果逐渐提升;当扫描速度为 $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,氧含量最低,说明此时附着在基体表面的锈蚀物质最少,清洗效果最好;随着扫描速度进一步增大,氧含量明显增加,随后趋于平缓。这进一步说明了当扫描速度过大时,锈蚀层仅达到熔化温度并未达到气化条件,仍然附着在基体之上,导致清洗效果并不明显。

3.3 物相分析

采用 XRD 对材料表面进行物相分析可以进一步确定激光清洗的效果。图 10 为激光扫描速度对 Q345 钢表面 XRD 谱的影响。当扫描速度为 0 时,锈层的 XRD 分析结果显示其主要成分为 Fe_2O_3 与 Fe_3O_4 。当扫描速度为 $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,激光清洗

后材料表面的 XRD 结果显示, Fe_2O_3 与 Fe_3O_4 的衍射峰已经消失,说明大量锈层已被去除;但由于此时的扫描速度较低,光斑的作用时间较长,基体又被氧化,进而产生了 FeO 。当扫描速度增大到 $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,铁的衍射峰强度最高,并且 FeO 衍射峰的强度较低,说明在该参数下铁锈的去除情况较好,并且基体发生二次氧化的部分较少,激光清洗效果较好。当扫描速度进一步增大到 $5000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, FeO 衍射峰强度增加,铁衍射峰降低;这可能是由于随着扫描速度增大,单位时间内激光的作用时间较短,锈层没有被清洗干净,残留在基体表面。

综上所述,合适的扫描速度有利于去除材料表面的金属氧化物且不产生二次氧化,在 $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速度下的激光清洗效果较好。

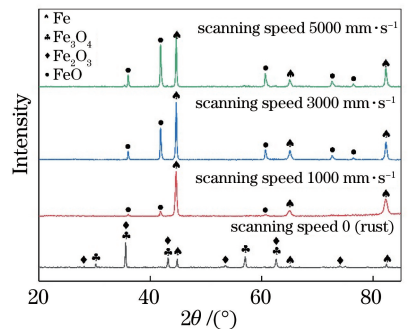


图 10 激光扫描速度对 Q345 钢表面 XRD 谱的影响

Fig. 10 Effect of laser scanning speed on XRD spectra of Q345 steel surface during laser cleaning

3.4 表面粗糙度及三维形貌

图 11 为激光扫描速度对 Q345 表面粗糙度的

影响,可见,随着扫描速度增大,表面粗糙度呈现出先降低后升高的趋势:当扫描速度较低($1000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)时,单个光斑的能量密度较高,光斑线宽 d_2 较大,易产生烧蚀坑,增大了材料的表面粗糙度^[17],此时材料表面的三维形貌如图 12(b)所示。扫描速度增大至 $3000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,激光的烧蚀作用减弱,材料表面的锈层发生气化,大量脱离基体表面,达到了较好的清洗效果。因此,在 $3000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的扫描速度下,材料的表面粗糙度最低,约为 $6.9\ \mu\text{m}$,如图 12(c)所示。当扫描速度较高时,光斑停留时间短,表面锈层吸收能量后发生部分熔化,但并未达到脱离基体所需的温度^[18],因此又与基体结合在一起,增大了表面粗糙度,如图 12

(d)所示。当扫描速度为 $6000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,材料的表面粗糙度最高,约为 $12.6\ \mu\text{m}$ 。

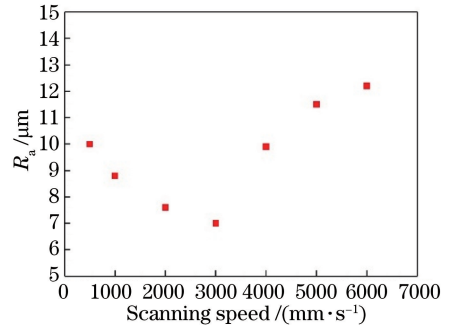


图 11 激光扫描速度对 Q345 表面粗糙度的影响
Fig. 11 Effect of laser scanning speed on surface roughness of Q345 steel during laser cleaning

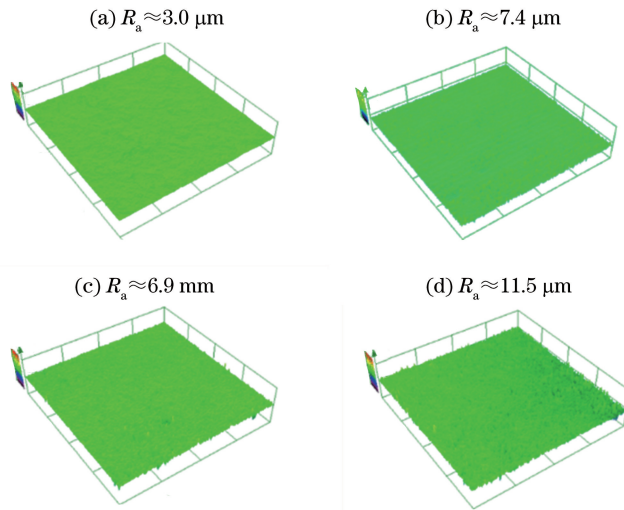


图 12 激光扫描速度对 Q345 钢表面三维形貌的影响。(a) 0 (未清洗);(b) $1000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$;
(c) $3000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$;(d) $5000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 12 Effect of laser scanning speed on three-dimensional surface morphology of Q345 steel during laser cleaning.
(a) 0 (not cleaned); (b) $1000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $3000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $5000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

3.5 电化学腐蚀性能

图 13 展示的是 Q345 钢锈层试样以及激光清洗后基材的极化曲线。Q345 钢锈层试样的自腐蚀电流密度为 $1.21 \times 10^{-4}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$;在 $1000, 3000, 5000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速度下清洗后,自腐蚀电流密度分别为 $5.19 \times 10^{-8}, 4.84 \times 10^{-8}, 2.02 \times 10^{-5}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$,如图 14 所示。

锈层疏松多孔的结构为溶解氧提供了通道,并促进了腐蚀反应的进行,从而使得腐蚀电流密度提高^[19]。自腐蚀电流密度是衡量腐蚀速度快慢的一个参数,自腐蚀电流密度越大,试样被腐蚀得越快,试样的耐蚀性越差。未经激光清洗的试样表面分布着大量不均匀的锈层,自腐蚀电流密度最大;激光以 $1000, 3000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的扫描速度清洗后,试样表面的

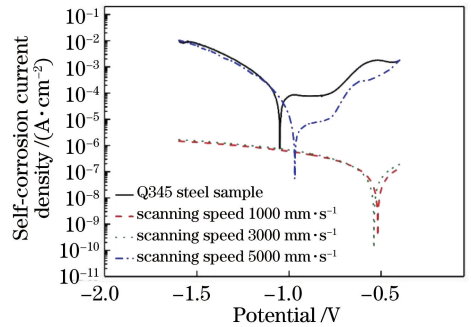


图 13 激光扫描速度对 Q345 钢表面极化曲线的影响
Fig. 13 Effect of scanning speed on surface polarization curve of Q345 steel during laser cleaning

大部分锈层被去除,露出试样基体,难以被腐蚀,因此自腐蚀电流密度减小;激光以 $5000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的扫

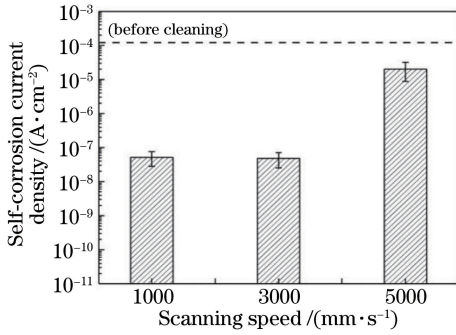


图 14 激光扫描速度对 Q345 钢表面自腐蚀电流密度的影响
Fig. 14 Effect of laser scanning speed on self-corrosion current density of Q345 steel surface

描述速度清洗后,材料表面的锈层清洗不干净,仍有部分锈层残留,所以相对于前者更易受到腐蚀。此外, Q345 钢锈层试样的自腐蚀电位为 -1.02 V ; 激光以 $1000, 3000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的扫描速度清洗后,自腐蚀电位增大到 -0.52 V 左右; 当激光的扫描速度提高到 $5000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,自腐蚀电位又降低到 -0.97 V ,与清洗前试样的自腐蚀电位较为接近。

综上所述,激光除锈后材料的耐蚀性有所增强,激光以 $3000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速度清洗后,基材表面的耐蚀性最佳。

4 结 论

本文利用激光清洗技术对 Q345 钢表面锈层进行了清洗实验,研究了扫描速度对清洗效果的影响,对除锈后试样的表面形貌、化学成分、表面粗糙度以及电化学腐蚀性能进行了分析,并对除锈的物理机制进行了讨论,得到的结论如下:

1) 激光作用于锈层会使其温度升高,当锈层温度达到气化点时,锈层会发生气化并脱离材料表面,同时基体并不会产生明显的烧蚀损伤。在一定的清洗速度下,扫描速度对激光清洗 Q345 钢表面锈层的影响较大; 当扫描速度小于 $1000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,单位时间内激光光斑的作用时间较长,激光对基体的损伤较大; 当扫描速度超过 $5000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,会有部分锈蚀残留于材料表面。

2) 随着激光扫描速度从 $1000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $6000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,清洗后 Q345 钢表面的铁含量呈现先增加后降低的趋势,而氧含量则是先降低再升高; 当扫描速度为 $3000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, Q345 钢表面铁元素的质量分数达到了峰值(约为 90%),而氧元素的质量分数则达到了谷值(约为 7%)。

3) 通过适当调节扫描速度可以获得较好的激

光清洗效果。当激光清洗速度为 $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、扫描速度为 $3000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,激光清洗效果较好, Q345 钢表面的铁氧化物较少,材料的表面粗糙度 R_a 约为 $6.9\text{ }\mu\text{m}$,且材料的电化学腐蚀性能也有所提高。

参 考 文 献

- [1] Lian R G, Dong S M. Research on inclusion in Q345 series of low-alloy plate[J]. Metal World, 2013(6): 21-24.
连容广, 董四美. Q345 系列低合金中厚板夹杂缺陷研究[J]. 金属世界, 2013(6): 21-24.
- [2] Chao B, Lu D F. The acid dipping treatment for steel materials[J]. Painting & Electroplating, 2009(3): 19-21, 35.
晁兵, 陆东方. 钢材的酸洗处理[J]. 涂装与电镀, 2009(3): 19-21, 35.
- [3] Zhao S B. Comparison of surface treatment methods for primer of shore container crane products[J]. Port Science & Technology, 2019(11): 29-33.
赵双宝. 岸边集装箱起重机产品底漆表面处理方法对比[J]. 港口科技, 2019(11): 29-33.
- [4] Jiang S W, Chen W, Liu G Y, et al. Research on sand blasting and derusting technology of steel bridge deck [J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2017(26): 103-105.
江胜文, 陈威, 刘广云, 等. 钢桥面喷砂除锈工艺研究[J]. 城市建设理论研究, 2017(26): 103-105.
- [5] Li P, Shi H X, Fu C, et al. High power nanosecond pulsed ytterbium-doped fiber laser for laser cleaning [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 121406.
李磐, 师红星, 符聪, 等. 激光清洗用高功率纳秒脉冲掺镱光纤激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 121406.
- [6] Yu H B. Laser cleaning technology research on metal surface[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 2-5.
俞鸿斌. 金属表面激光清洗技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 2-5.
- [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] Ke L, Zhu H H, Lei W J. Laser cleaning of rust on ship steel using TEA CO₂ pulsed laser [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7515: 75150Q.
- [9] Qiu Z B, Zhu H H. Process parameter study on the removing rust using pulsed laser[J]. Applied Laser, 2013, 33(4): 416-420.

- 邱兆飏, 朱海红. 脉冲激光除锈工艺研究[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 416-420.
- [10] Wang K J. Study on pulsed laser derusting process of Q235 carbon steel[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017: 10-15.
王凯杰. Q235 碳钢脉冲激光除锈工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 10-15.
- [11] Xie Y F, Liu H W, Hu Y X. Determining process parameters for laser derusting of ship steel plates[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403008.
解宇飞, 刘洪伟, 胡永祥. 船舶板材激光除锈工艺参数确定方法研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403008.
- [12] Cui L J, Guo Q, Wang C Y, et al. Experimental research on the dry laser cleaning process[J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2018, 29(4): 29-32.
崔陆军, 郭强, 王成银, 等. 干式激光清洁加工工艺实验研究[J]. 中原工学院学报, 2018, 29(4): 29-32.
- [13] Lei Z L, Sun H R, Chen Y B, et al. Elimination of rusting layer from high-strength steel surface using different laser cleaning methods[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702003.
雷正龙, 孙浩然, 陈彦宾, 等. 不同激光清洗方法对高强钢表面锈蚀层的去除研究[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702003.
- [14] Wang H, Man S J, Liu L S, et al. Mechanism of derusting by laser-diode pumped acousto-optic Q-switch Nd:YAG laser[J]. Cleaning World, 2018, 34(5): 37-41.
王欢, 蒯诗洁, 刘丽飒, 等. LD 泵浦声光调 Q Nd:YAG 激光扫描除锈机制[J]. 清洗世界, 2018, 34(5): 37-41.
- [15] Gao L Y, Zhou J Z, Sun Q, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser-cleaned aluminum alloy paint layer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0502002.
高辽远, 周建忠, 孙奇, 等. 激光清洗铝合金漆层的数值模拟与表面形貌[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502002.
- [16] Guo T Y, Zhang L M, Ren Y Y, et al. Surface characteristics of CaF₂ crystal ablated by femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126019.
郭太勇, 张立木, 任莹莹, 等. 飞秒激光烧蚀氟化钙晶体表面特性[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126019.
- [17] Li H T, Zhou J Z, Sun Q, et al. Electrochemical corrosion properties of AH32 steel via laser cleaning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 211403.
李华婷, 周建忠, 孙奇, 等. 基于激光清洗的 AH32 钢的电化学腐蚀性能[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 211403.
- [18] Zhang X, Liu K, Wang M D, et al. Etching technology for copper-clad laminates based on femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1214003.
张晓, 刘凯, 王明娣, 等. 基于飞秒激光的覆铜板刻蚀工艺[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1214003.
- [19] Sun B L. Electrochemical corrosion characteristics of low-carbon alloy steel in NaCl solution [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2013: 55-60.
孙宝龙. 低碳合金钢在 NaCl 溶液作用下的电化学腐蚀特征[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2013: 55-60.