

激光频率对激光干式清洗机理及表面性能的影响

万壮¹, 杨学锋¹, 夏国峰¹, 李丹¹, 刘文波¹, 成健², 王守仁¹

(1. 济南大学 机械工程学院, 济南 250022; 2. 湖北工业大学 机械工程学院, 武汉 430000)

摘要: **目的** 探究不同频率下激光干式清洗的清洗效果、清洗机理及清洗后材料的表面性能。**方法** 通过理论计算, 得出较优频率, 并采用固体光纤激光器, 控制清洗频率单因素参数, 以 Q235 低碳结构钢表面氧化层为例进行清洗实验。**结果** 在 350 kHz 清洗后, 样品的表面效果最佳; 频率为 250 kHz 时, 样品的表面粗糙度达到最低值, 为 2.572 μm , 基体轻微损伤; 频率为 150 kHz 时, 样品摩擦系数达到最大值, 为 0.3905, 基体损伤最大。Q235 表面氧化层激光干式清洗机理为烧蚀及溅射, 随频率的增加, 烧蚀作用逐渐下降, 溅射作用逐渐增强。当频率为 550 kHz 时, 烧蚀作用最低, 占比为 68%; 频率为 150 kHz 时, 基体损伤, 样品表面发生二次氧化, 受损严重, 表面粗糙度值最大。在 250~550 kHz, 随频率的增大, 样品的表面粗糙度呈上升趋势。激光干式清洗后, 样品表面的摩擦系数总体呈下降趋势, 且在频率为 150 kHz 时, 激光能量密度最大, 激光强化作用最明显。随频率的增加, 样品清洗表面残余应力下降。在激光频率为 350 kHz 清洗后, 样品表面的电化学腐蚀性能最好。**结论** 在激光干式清洗时, 频率作为一个重要参数, 对清洗效果、清洗机理及表面性能有显著影响。

关键词: 清洗频率; 清洗机理; 表面性能; 激光清洗; 清洗效果

中图分类号: TG156.99; TN249 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)05-0070-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.006

Effect of Laser Frequency on the Mechanism and Performance of Laser Dry Cleaning

WAN Zhuang¹, YANG Xue-feng¹, XIA Guo-feng¹, LI Dan¹, LIU Wen-bo¹,
CHENG Jian², WANG Shou-ren¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430000, China)

ABSTRACT: The cleaning effect, cleaning mechanism and surface performance under different frequencies were investigated.

收稿日期: 2020-06-06; 修订日期: 2020-08-13

Received: 2020-06-06; Revised: 2020-08-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51872122); 中国博士后科学基金 (2017M620286); 山东省重点研发计划 (2018CXGC0809); 山东省农机装备研发创新计划 (2018YF012)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51872122); The Postdoctoral Science Foundation of China (2017M620286); The Key Research and Development Program of Shandong Province, China (2018CXGC0809); Agricultural Machinery Equipment Research and Development Innovation Plan of Shandong Province (2018YF012)

作者简介: 万壮 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光清洗。

Biography: WAN Zhuang (1995—), Male, Master candidate, Research focus: laser cleaning.

通讯作者: 杨学锋 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为摩擦润滑理论及工程应用。邮箱: me_yangxf@ujn.edu.cn

Corresponding author: YANG Xue-feng (1977—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: covers friction and lubrication theory and engineering applications. E-mail: me_yangxf@ujn.edu.cn

引文格式: 万壮, 杨学锋, 夏国峰, 等. 激光频率对激光干式清洗机理及表面性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 70-77.

WAN Zhuang, YANG Xue-feng, XIA Guo-feng, et al. Effect of laser frequency on the mechanism and performance of laser dry cleaning[J]. Surface technology, 2021, 50(5): 70-77.

The optimal frequency can be obtained by theoretical calculation. Solid fiber laser was used in the experiment. The cleaning frequency single factor parameter was controlled. The surface oxide layer of Q235 low carbon structural steel was taken as an example for the cleaning experiment. The results showed that the surface of the sample was the best after being cleaned at 350 kHz frequency. When the frequency was 250 kHz, the surface roughness of the sample reached a minimum value of 2.572 μm , and the matrix was slightly damaged. When the frequency was 150 kHz, the friction coefficient of the sample reached a maximum value of 0.3905 and the matrix damage was also the maximum. The surface oxide layer cleaning mechanism of Q235 was ablative and sputtering. With the increase of frequency, the ablative effect decreased gradually but the sputtering effect increased gradually. When the frequency was 550 kHz, the lowest proportion of ablation was 68%. When the frequency was 150 kHz, the sample surface was secondary oxidized. The matrix surface was seriously damaged, and the surface roughness was the largest. In the range of 250~550 kHz, the surface roughness of the sample increased with the increase of frequency. With the increase of frequency, the overall tendency of the surface friction coefficient decreased after the laser dry cleaning. When the frequency was 150 kHz, the laser energy density was the highest and the laser enhancement was the most obvious. The residual stress of the sample cleaning surface decreased with increasing frequency. With the laser of a frequency of 350 kHz, the electrochemical corrosion performance of the surface was the best. If it is higher or lower than this frequency, the electrochemical corrosion performance of the surface will decrease after the cleaning. In laser dry cleaning, frequency as an important parameter has a significant influence on the cleaning effect, cleaning mechanism and surface performance.

KEY WORDS: cleaning frequency; cleaning mechanism; surface performance; laser cleaning; cleaning effect

在工业生产中，仍在大量使用传统的清洗方式，清洗弊端暴露无遗。机械清洗有精度缺陷及二次污染，化学清洗对环境污染严重，超声波清洗难以满足高精度需求，而且清洗后的干燥问题也是处理难点。区别于传统清洗，激光清洗具有高效、环保、机体损伤小、自动化程度高的优点。激光清洗方法主要有 3 类：激光干式清洗法^[1-2]、激光湿式清洗法^[3]、激光等离子冲击波清洗法^[4-5]。其中激光干式清洗方法的操作最为简单，应用最为广泛^[6]。只要激光器选择适当，并且清洗参数合适，就可以应用到大部分清洗表面^[7-10]。通过对激光干式清洗机理的研究，可以将激光干式清洗的去除机理概括为 2 种：烧蚀机理和溅射机理^[11]。烧蚀机理是烧蚀去除，去除物将进入空气中^[12]；溅射机理是振动去除或者膨胀弹性去除，去除物溅射到样品周围^[13]。

激光清洗最先于 20 世纪 70 年代由美国科学家提

出。1987 年，苏联科学家发表了第一篇关于激光清洗的论文。随后 1988 年，德国科学家申请了第一个关于激光清洗的专利。近些年来，激光清洗已经应用到各个方面。英国曾用激光清洗技术对教堂进行维护，美国将其应用到航天上漆和铁锈的去除。国内激光清洗领域近几年也发展迅速，但是对于激光清洗各参数与清洗质量的定量关系，以及清洗过程中各参数对清洗机理的影响规律，国内外仍然缺乏系统的研究，只是凭借经验摸索^[14]。

表 1 列举了激光干式清洗不同材料的工艺参数^[18-25]，可以看出，激光频率是激光清洗的一个重要参数。为此，本文以 Q235 低碳素结构钢表面氧化层为例，运用固体光纤激光器对其进行激光干式清洗实验，研究不同激光频率对清洗效果以及表面性能的影响规律，分析不同激光频率清洗下的主要去除机理，为以后的实验研究和工业应用提供参考。

表 1 不同激光干式清洗的激光参数
Tab.1 Laser parameters of different laser dry cleaning

Clean things	Laser	Parameter
Oxide and rust removal	Nd: YAG laser (Q switching)	Power is 1500 W, wavelength of 1064 nm, pulse time 10 ns, frequency of 360 kHz, the scanning speed is 10 mm/s, spot diameter 140 μm , auxiliary gas pressure 0.5 MPa ^[15]
Nuclear facilities	Nd: YAG laser (Q switching)	Wavelength of 1064 nm, pulse width 100 ps, power is 13 W, the focal length of 2.5 mm, sweep speed is 10 mm/s ^[16]
Oil residue	Nd: YAG laser (Q switching)	Wavelength of 1064 nm, pulse width 100 ps, wavelength of 10 nm, duration 6 ns, spot diameter 9 nm, frequency of 10 kHz ^[17]
Marine steel plate before welding paint	Fibre laser	Wavelength of 1064 nm, wavelength of 30 nm, spot diameter 100 μm , pulse width 50 ns, power 30 W
Mould	Carbon dioxide laser	Power is 80 W, pulse frequency 10 kHz, the speed is 5 mm/s

1 实验

实验采用 Q235 低碳结构钢, 其应用广泛, 具有研究价值。样品尺寸为 20 mm×20 mm, 表面带有氧化层。采用固体光纤激光器, 激光波长为 1064 nm, 扫描速度为 7000 mm/s, 清洗功率为 90 W, 脉冲宽度为 340 ns, 光斑直径为 50 μm。

控制清洗频率为单一变量, 分别采用 150、250、350、450、550 kHz, 在室温条件下清洗。在实验时, 将样品放在一张尺寸远大于样品的纸张上, 纸张质量为 m_0 , 激光干式清洗前样品质量为 m_1 。在进行激光干式清洗时, 由于溅射机理去除的氧化层会溅落于纸张之上, 激光干式清洗后, 样品和纸张的质量为 m_2 , 样品的质量为 m_3 。由于烧蚀机理去除的氧化层会进入空气中, 不计入实验之后的称量结果。因此, 激光干式清洗去除的氧化物总质量 $m_4 = m_3 - m_1$, 烧蚀机理去除的氧化层质量 $m_5 = m_2 - m_1 - m_0$ 。

称量天平为电子天平, 称量精度为 0.1 mg。通过计算烧蚀机理去除氧化层的质量与去除氧化层总质量的比值, 可以得出在激光干式清洗 Q235 表面氧化层的去除机理。为分析不同频率对清洗后表面性能的影响, 对样品清洗前后的表面性能做了一系列的测试。由 RTECMFT-3000 摩擦磨损试验机测得摩擦系数。粗糙度借助 USP-Sigma 型白光干涉仪获取。采用 JSM-7610F 型扫描电镜观测清洗表面的微观形貌。清洗表面的能谱分析采用 X-MAX50 型 X 荧光光谱分析仪。残余应力的测量采用 X 射线残余应力分析仪 (iXRD Combo 型)。应用 Keyence VHX-2000 超景深显微镜观察清洗后的表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 清洗频率分析

用式 (1) 计算在室温条件下将实验样品表面氧化层气化所需的热量 Q 。用式 (2) 计算清洗样品时的激光能量密度。

$$Q = cm(t - t_0) \quad (1)$$

式中: c 为比热容; m 为质量; t 为最终温度; t_0 为初始温度。

$$I = \frac{P}{f \cdot S} \quad (2)$$

式中: I 为能量密度; P 为激光功率; f 为激光频率; S 为单位面积。

Q235 表面氧化层的比热容为 502 J/(kg·℃), 气化温度大约在 1500 ℃, 所以在室温条件下, 实验样品 Q235 表面氧化层气化所需的热量约为 47.3 J。将激光功率 90 W、激光光斑直径 0.05 mm 等参数代入式 (2), 计算得出激光频率为 250、350、450 kHz 时, 激光干式清洗的能量密度分别为 18.34、13.1、10.19 J/cm²。从式 (2) 可以看出, 在激光功率的数值一定的情况下, 激光能量密度数值的大小与激光频率值的大小成反比。由于清洗尺寸为 20 mm×20 mm 的样品所需要的能量为 52.41 J, 所以激光干式清洗功率为 350 kHz 就可以满足清洗需求。

2.2 不同频率清洗效果分析

通过实验验证 2.1 小节的理论计算结果。不同频率下的激光干式清洗效果如图 1 所示, 对应频率下的 EDS 能谱见图 2。

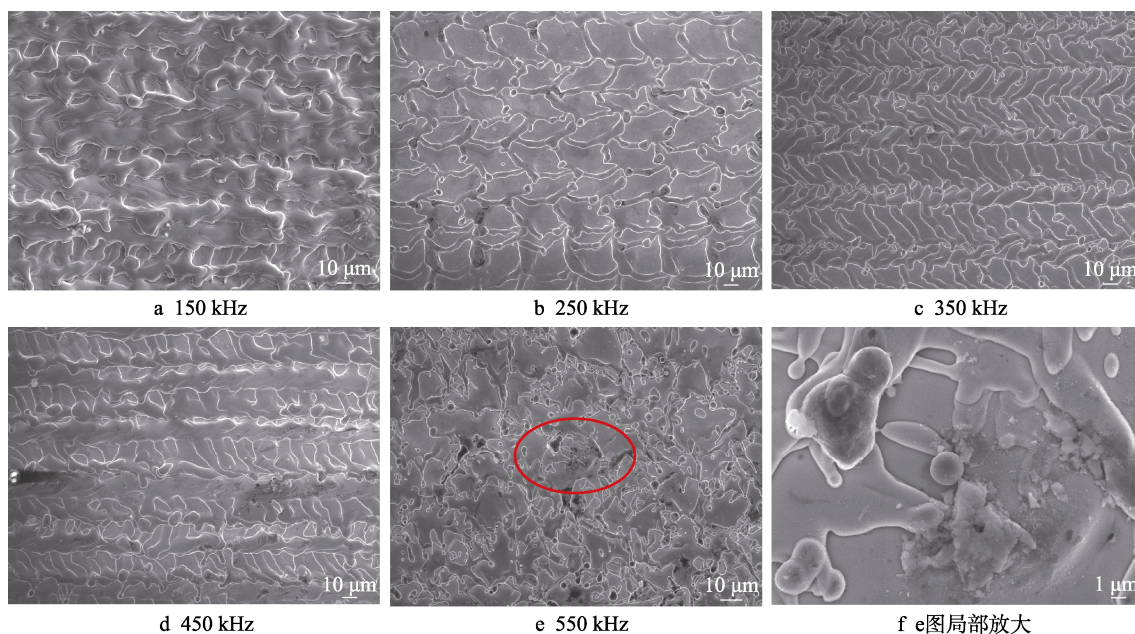


图 1 不同频率激光干式清洗后表面的 SEM 图像

Fig.1 SEM images of the surface after dry laser cleaning with different pulse frequencies (fig.f a local enlarged version of fig.e)

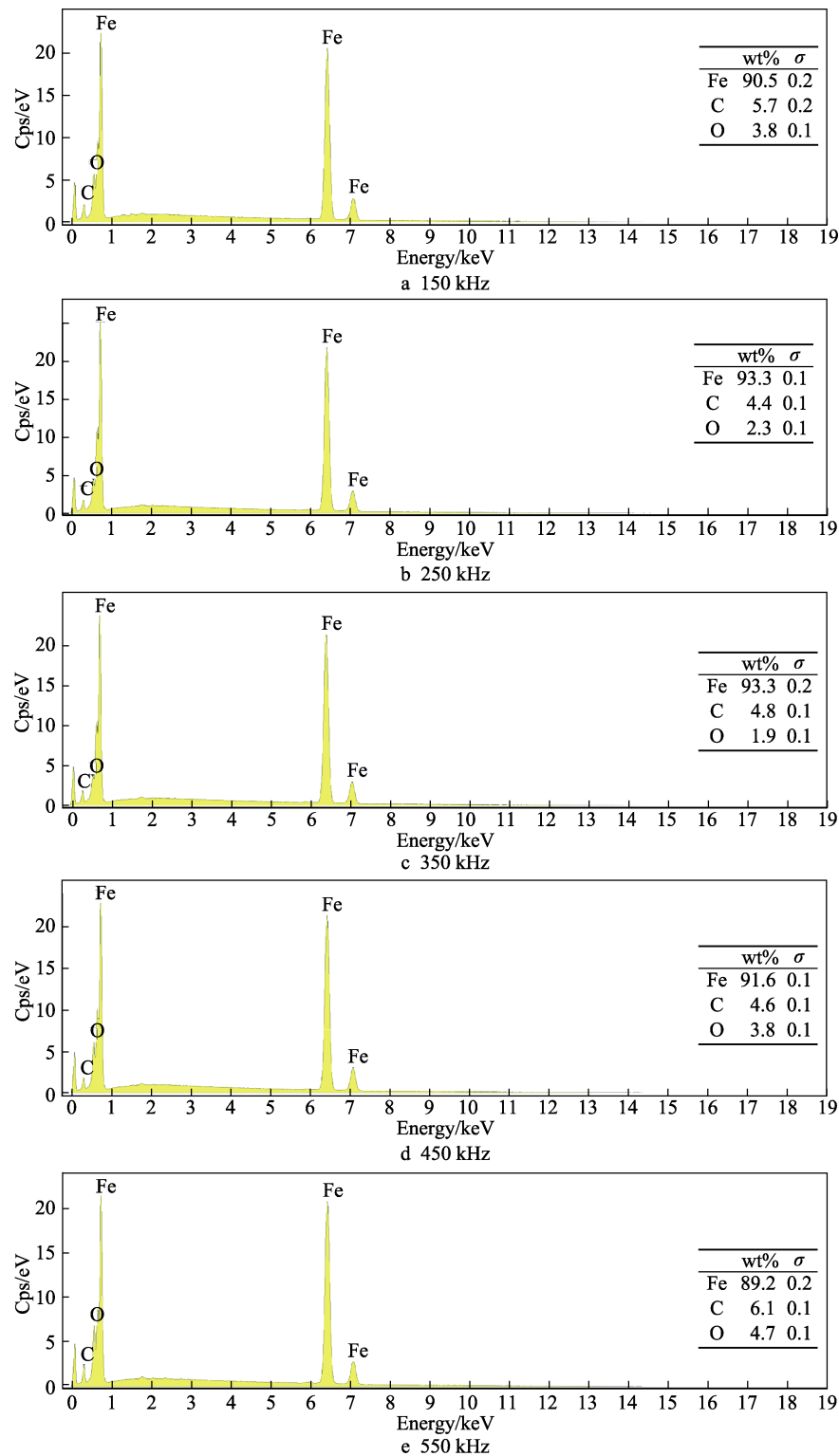


图 2 不同频率激光干式清洗后样品表面 EDS 能谱
Fig.2 EDS diagram of sample surface after dry cleaning with different pulse frequencies by laser

在频率为 350 kHz 时,激光干式清洗的清洗效果最好,样品的表面纹理排布规则,且没有黑色斑点(如图 1c 所示)。结合图 2 可知,在激光频率为 350 kHz 下清洗后,样品表面的氧元素含量最低,也可以说明在此频率下的清洗效果最好。根据式(2),在激光干式清洗的功率和扫描速度值不变的情况下,激光干式

清洗的能量密度与激光频率成反比。当频率为 150 kHz 时,在实验参数区间内,激光干式清洗的能量密度最大。在 150 kHz 清洗后,由于激光能量密度过大,样品表面已经出现大面积的块状(如图 1a 所示),这是由于激光将清洗样品表面熔融后二次氧化造成的。当频率为 550 kHz 时,激光能量密度最小,清洗后样

品表面纹理紊乱,并且斑点遍布(如图1e所示)。图1f是图1e的局部放大图,可以看到清洗后的表面粗糙暗淡,未去除的氧化层杂乱分布。由550 kHz清洗后表面的EDS图(图2e)可以看出,氧含量明显高于其他参数下的值,直观地说明了在此频率下清洗效果极差。对比激光频率为250、350 kHz的EDS图可以看出,250 kHz时的氧含量明显高于350 kHz时的值,此时样品表面已经发生轻微的氧化。从图1b可以看出,250 kHz清洗后,样品表面的纹理变得平整,虽然还保留着激光清洗的痕迹,但是立体效果明显下降,其表面也已经出现了氧化的斑点,这也解释了氧含量升高的原因。通过对比450 kHz与350、550 kHz的SEM和EDS图可以看出,在450 kHz频率下,清洗是一个过渡阶段,是从清洗效果极差到最佳的一个中间过程。图1d可以说明,经过450 kHz激光干式清洗后,其表面已经存在清理纹理,并且表面的斑点分布也明显减少。图2d也说明频率为450 kHz时,清洗后样品表面的氧含量低于550 kHz下的值,却远高于350 kHz下的值。

2.3 不同频率对清洗机理的影响

为了确保实验结果的准确性,本实验采用烧蚀作用去除氧化层的质量在去除氧化层总质量中的占比,来反映激光清洗过程中的清洗机理。称量并计算出溅射作用和烧蚀作用去除氧化层的质量,见表2。

表2 烧蚀作用与溅射作用去除氧化物的质量
Tab.2 Removal mass of oxide by ablation and sputtering

Frequency/kHz	Removed by the ablation effect/g	Removed by the sputtering effect/g
150	0.029	0.002
250	0.027	0.004
350	0.025	0.006
450	0.015	0.005
550	0.013	0.006

观察表2可以看出,激光干式清洗Q235表面氧化层的主要作用机理是烧蚀去除。在激光频率为150~550 kHz时,随着激光频率的增大,烧蚀作用去除的氧化层质量减小,去除样品表面氧化层的总质量减小。由图3可以看出,随着激光频率的增大,烧蚀作用去除氧化层的质量占比是逐渐减少的。在频率为350 kHz时,样品表面的氧化层已经被去除。随着频率继续减小,导致样品本身的基体被去除,对基体产生损伤。结合表2和图3得出,采用激光干式清洗Q235低碳结构钢表面氧化层,当控制频率为唯一变量时,其清洗机理是烧蚀作用与溅射作用并存的,并不是单一因素的清洗机理。其中烧蚀作用为主要清洗机理,其占比最高在90%左右。当达到最高占比时,Q235基体已经被去除,产生损伤。烧蚀作用去除氧

化层随着激光频率的增加而降低,因为在其他参数一定的情况下,激光能量密度会随着清洗频率的降低而增大。

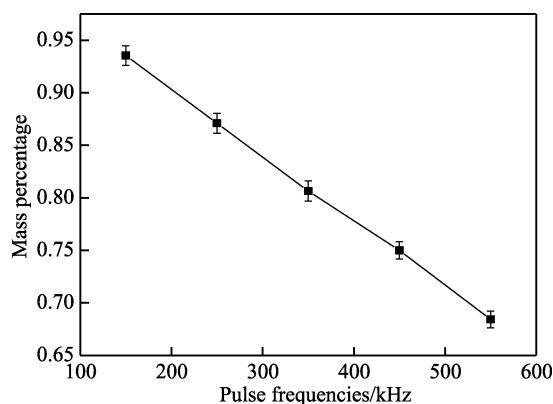


图3 不同频率下烧蚀作用去除氧化层的质量占比
Fig.3 Influence of different pulse frequencies on the removal mechanism of laser dry cleaning

2.4 不同频率对表面性能的影响

2.4.1 对粗糙度的影响

激光清洗前的Q235结构钢表面氧化层凹凸不平,并且杂质斑驳分布。经过激光干式清洗后,激光的强能量会熔融氧化层,不但会消除原表面的凹凸不平及杂质,而且会使清洗后的表面形成清洗纹理。这种排布规则的清洗纹理会很大程度地降低清洗表面的粗糙度,从清洗前的10.26 μm 降到3.15 μm 左右(经550 kHz频率清洗后的值)。从图4可以看出,在250~550 kHz的清洗频率区间,清洗后样品表面的粗糙度呈上升趋势。在频率为150 kHz时,Q235低碳结构钢基体的基体被激光去除,样品表面被二次氧化,基体表面受损严重。结合图1可知,虽然350 kHz时的清洗效果最好,氧化层被完全去除,表面清洗纹理规则有序,并且立体效果明显,但是并没有使得粗糙度值达到最低,而在频率为250 kHz时,粗糙度达到最低。因为在350 kHz时,表面的氧化层已经被完全去除,但是会形成规则有序、立体效果明显的清洗纹理。当频率继续降低到250 kHz时,相对350 kHz,能量密度变大,多余的激光能将原本排布规律、凹凸有致的表面纹理熔融,归于平整,使清洗后形成的纹理相对平坦,因此该频率下的粗糙度最低。在150~550 kHz,两个极值频率清洗后的表面相对粗糙。因为在550 kHz时,清洗效果初步体现,样品表面氧化层去除不理想,甚至没有形成清洗后的表面纹理,样品表面的氧化物与熔融的基体混合,使表面变得凹凸不平,粗糙度数值变大。在150 kHz时,样品表面严重氧化,被激光熔融的基体二次氧化,冷却后形成的板状区域斑驳分布在基体表面,严重影响了清洗表面的粗糙度。在450 kHz时,清洗后样品表面的部分区域出现清洗纹理,说明这部分区域氧化层已经基本被

去除, 虽然表面仍有氧化物的残留, 但相对于频率为 550 kHz 的清洗表面, 有了进一步的清洗效果, 粗糙度数值下降。激光干式清洗对表面粗糙度的影响与清洗效果和清洗纹理的分布有一定的关系, 不同的清洗频率会影响激光清洗效果以及清洗纹理, 清洗效果好且纹理分布规则的样品, 表面粗糙度相对较低。

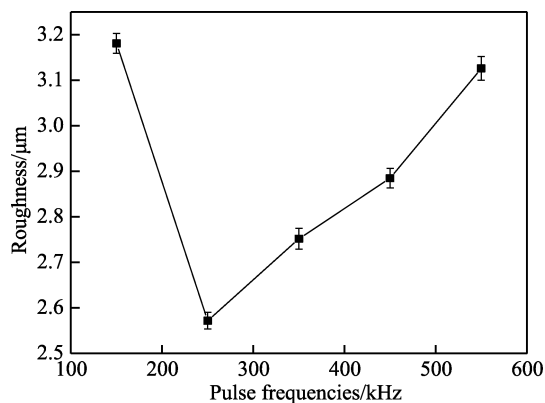


图 4 清洗后样品表面粗糙度

Fig.4 Broken line diagram of surface roughness of the sample after cleaning

2.4.2 对摩擦系数的影响

在 150~550 kHz 内激光干式清洗后, 样品表面的摩擦系数随清洗频率的增大, 总体呈下降趋势, 如图 5 所示。这是由于激光加工时存在表面强化作用, 在频率为 150 kHz 时, 激光能量密度最大, 激光强化作用最明显; 在激光频率为 550 kHz 时, 能量密度最小, 激光强化作用最弱。样品表面的氧化层会起到一定的抗磨损作用, 而当样品经过 550 kHz 的激光清洗之后, 会将样品表面的氧化层破坏, 并部分去除。没有了氧化层的抗磨损作用, 在 550 kHz 时, 样品的摩擦系数十分低, 甚至低于样品清洗前的摩擦系数 (0.4062)。在频率为 450 kHz 时, 虽然表面的氧化层也被破坏并部分去除, 但是部分区域已经形成清洗纹理, 这些纹理会起到抗磨损的作用, 使得摩擦系数升高。在频率

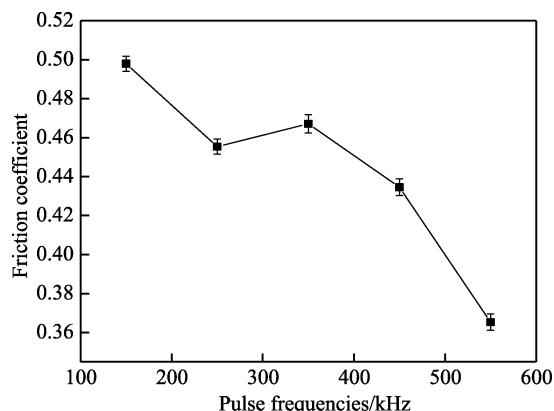


图 5 清洗后样品表面的摩擦系数

Fig. 5 Broken line diagram of friction coefficient of sample surface after cleaning

为 350 kHz 时, 氧化层已经被完全去除, 基体表面形成规则的纹理, 对样品表面的抗磨损性有进一步强化作用, 如图 6 所示。另外从图 5 中可以看出, 摩擦系数的下降趋势并非呈现线性, 在频率为 250 kHz 时出现奇点。这是由于当频率继续减小到 250 kHz 时, 基体表面纹理被破坏, 使得原先高低有序的纹理变得平整, 由纹理产生的抗磨损作用下降, 导致摩擦系数降低。当激光频率减小到 150 kHz, 样品表面被严重氧化, 但激光的表面强化作用最明显, 使得摩擦系数迅速上升达到本次实验的最高值。

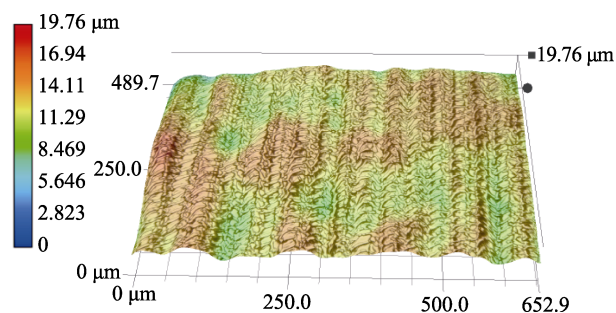


图 6 350 kHz 清洗后的超景深观测形貌

Fig.6 Observation graph of depth-of-field after 350 kHz cleaning with pulse frequency

2.4.3 对残余应力的影响

150~550 kHz 内, 改变清洗频率得到的残余应力变化如图 7 所示。随着频率的增加, 样品清洗表面的残余应力不断下降。测试清洗前的试样表面, 残余应力为负值, 即为压应力, 而清洗后, 试样的残余应力为正值, 即为拉应力。因为清洗的样品都是热轧成块, 所以清洗前的残余应力为压应力。清洗表面的残余应力显示为拉应力, 一方面是由于激光的高能量将样品表面熔融, 随着激光光斑移动, 熔融状态表面会产生波动堆积, 形成表面纹理, 使得清洗后表面的残余应力为拉应力。另一方面, 由于激光清洗时, 热影响的深度较浅, 导致激光扫过之后表面不同深度的温度变化极大, 基体深表面区域温度变化小, 热胀冷缩程度

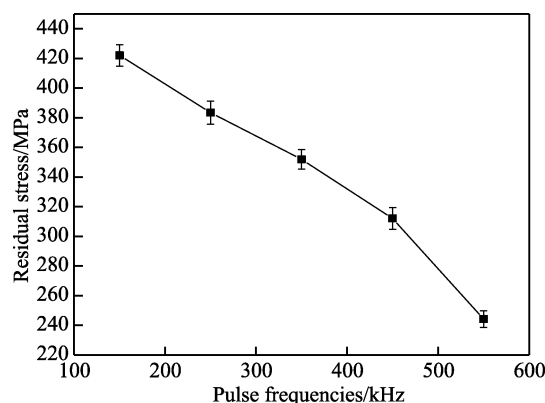


图 7 清洗后样品表面的残余应力

Fig.7 Broken line diagram of residual stress on the surface of samples after cleaning

低, 浅表面区域温变大, 热胀冷缩程度高, 所以深表面区域会对浅表面区域的热胀冷缩产生抑制作用, 使得表面产生的残余应力为拉应力。

2.4.4 对电化学腐蚀的影响

不同激光频率下清洗表面的极化曲线如图 8 所示。在频率为 350 kHz 时, 自腐蚀电位最高, 为 -0.97 V。图 9 中直线为清洗前样品表面电化学分析的自腐蚀电流密度值。自腐蚀电流密度是衡量腐蚀速率快慢的标准。自腐蚀电流小, 腐蚀速率快, 样品表面容易被腐蚀, 耐腐蚀性差。样品表面氧化层是由于 Q235 钢板高温热轧氧化而成, 其结构致密, 与基体结合程度高, 区别于普通锈蚀氧化的多孔而松散。因此, 这种致密的氧化层对电化学腐蚀有一定的抵制作用, 使得清洗前样品表面的自腐蚀电流密度较低。当经过激光频率为 450 kHz 和 550 kHz 的清洗后, 破坏了原本致密的氧化层, 但是没有完全去除, 残留的氧化层使得表面更容易被腐蚀, 因此在这两种频率下清洗后, 表面的自腐蚀电流密度远高于清洗前。当经过频率为 350 kHz 的激光清洗后, 氧化层被完全去除, Q235 基体完全裸露, 相对于去除不完全的表面, 抗腐蚀性更高, 自腐蚀电流密度最小。频率为 250 kHz 时, 清洗表面被轻微氧化, 对腐蚀的影响很小。当清洗频

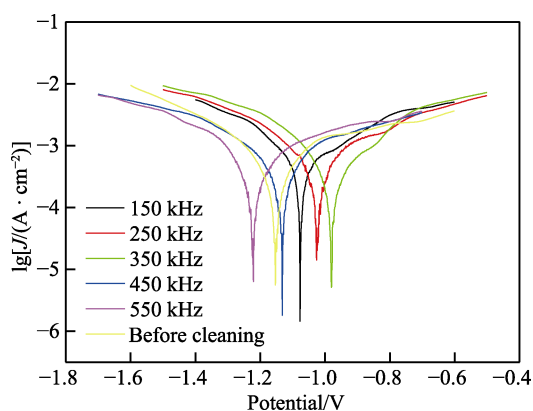


图 8 不同扫描速度清洗前后清洗表面的极化曲线

Fig.8 Polarization curves of the cleaned surface after laser cleaning with different scanning speeds

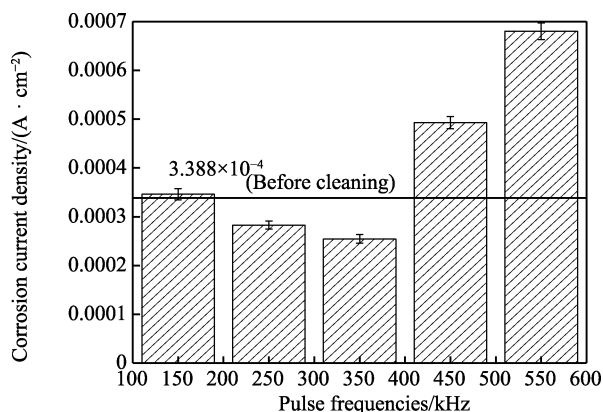


图 9 自腐蚀电流密度

Fig.9 Self-etching current density

率为 150 kHz 时, 激光能量最强, 清洗完成后, 残余的大部分能量会严重氧化已经清洗完成的表面, 形成的块状区域与基体结合作用更强, 但又不像致密氧化层一样将基体完全覆盖, 此时的自腐蚀电流密度较清洗前略微升高。综上所述, 在对 Q235 表面氧化层进行激光清洗时, 若清洗不完全, 会破坏致密氧化层, 使得表面的抗腐蚀性能下降, 但当完全清洗后, 表面的抗腐蚀性能会明显提高。

2.5 清洗机理

综合分析计算与实验得到的一系列数据得出, 在对 Q235 低碳结构钢表面氧化层进行激光清洗时, 其去除机理主要是烧蚀 (如图 10a 所示)。当激光能量辐射氧化层的表面时, 大量激光能量被氧化层吸收, 使得氧化层内的温度急速提高。当温度达到甚至高于材料气化、分解、烧蚀温度点时, 氧化层会被气化、降解、燃烧, 使得氧化层逐渐消失。

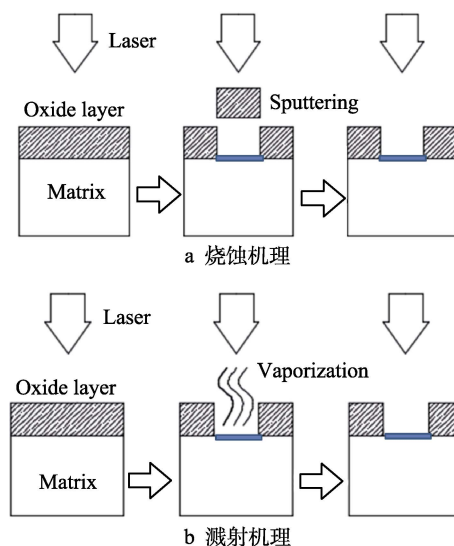


图 10 激光清洗机理

Fig.10 Schematic diagram of the laser cleaning mechanism: a) schematic diagram of ablative mechanism; b) schematic diagram of sputtering mechanism

当激光照射到基体, 最先与基体表面的氧化层接触, 由于表面的氧化层很薄, 大部分的激光能量会通过表面的氧化层, 到达基体, 并且在基体的金属表面发生反射和吸收。当氧化层和基体的金属表面都吸收了能量后, 温度迅速升高, 产生热膨胀。这种热膨胀会破坏基体的金属表面与氧化层的结合力, 致使氧化层脱离基体。结合图 10 以及清洗后的 SEM 图 (图 1), 激光去除氧化层的同时, 也会将基体的表面纹理化, 清洗后样品的表面性能发生改变, 粗糙度降低, 摩擦系数升高, 残余应力由压应力变为拉应力。

3 结论

本次实验探究了在 150~550 kHz 内, 随着频率的

变化, 激光干式清洗对 Q235 低碳结构钢表面氧化层的清洗机理、清洗效果、表面性能的影响, 得出以下结论:

1) 清洗机理是烧蚀机理与溅射机理并存, 但是以烧蚀机理为主, 溅射机理为辅。烧蚀作用随着频率的减小而增强, 但是溅射作用受激光频率的影响不大。

2) 频率为 350 kHz 时, 激光清洗效果最好, 表面纹理规则, 排布有序。频率升高, 清洗不完全, 表面有一定的氧化层残余; 频率降低, 基体表面受损, 且随着频率的降低, 受损加重。

3) 清洗效果和清洗纹理对表面性能有重要影响, 不同的清洗频率会影响激光清洗效果以及清洗纹理, 清洗效果好且纹理分布规则的样品, 表面性能较优。激光清洗伴随着激光强化作用, 在不损伤基体的前提下, 这种激光强化作用越强, 表面的性能越好。

参考文献:

- [1] KHEDR A, PAPADAKIS V, POULI P, et al. The potential use of plume imaging for real-time monitoring of laser ablation cleaning of stonework[J]. *Applied physics B: Lasers and optics*, 2011, 105(2): 485-492.
- [2] RAUH B, KRELING S, KOLB M, et al. UV-laser cleaning and surface characterization of an aerospace carbon fibre reinforced polymer[J]. *International journal of adhesion and adhesives*, 2018(82): 50-59.
- [3] ROSMEJ O, ANDREEV N E, ZAEHTER S, et al. Interaction of relativistically intense laser pulses with long-scale near critical plasmas for optimization of laser based sources of MeV electrons and gamma-rays[J]. *New journal of physics*, 2019, 21: 043044.
- [4] LU Y F, ZHANG Y, WAN Y H, et al. Laser cleaning of silicon surface with deposition of different liquid films[J]. *Applied surface science*, 1999, 138-139: 140-144.
- [5] KUMAR A, PRASAD M, BHATT R B, et al. Laser shock cleaning of radioactive particulates from glass surface[J]. *Optics and lasers in engineering*, 2014, 57: 114-120.
- [6] KUMAR A, PRASAD M, BHATT R B, et al. A comparative study on laser induced shock cleaning of radioactive contaminants in air and water[J]. *Optics & laser technology*, 2018, 100: 133-138.
- [7] TSEREVELAKIS G J, SANTIAGO P A J, PANAGIOTIS S, et al. On-line photoacoustic monitoring of laser cleaning on stone: evaluation of cleaning effectiveness and detection of potential damage to the substrate[J]. *Journal of cultural heritage*, 2018, 35: 108-115.
- [8] ZHENG Y W, LUK'YANCHUK B S, LU Y F, et al. Dry laser cleaning of particles from solid substrates: experiments and theory[J]. *Journal of applied physics*, 2001, 90(5): 21-35.
- [9] ARNOLD N. Theoretical description of dry laser cleaning[J]. *Applied surface science*, 2003, 208-209: 15-22.
- [10] GROJO D, CROS A, DELAPORTE P, et al. Experimental investigation of ablation mechanisms involved in dry laser cleaning[J]. *Applied surface science*, 2007, 253(19): 8309-8315.
- [11] FERNANDES A J, KANE D M. Dry laser cleaning threshold fluence: How can it be measured accurately[C]// *Proceedings of second international symposium on laser precision microfabrication*. [s. l.]: SPIE, 2002.
- [12] LUK'YANCHUK B S, ZHENG Y W, LU Y F. New mechanism of laser dry cleaning[J]. *Proceedings of spie the international society for optical engineering*, 2001, 4423: 115-126.
- [13] PSYLLAKI P, OLTRA R. Preliminary study on the laser cleaning of stainless steels after high temperature oxidation[J]. *Materials science & engineering A*, 2000, 282(1-2): 145-152.
- [14] KUMAR A, SONAR V R, DAS D K, et al. Laser cleaning of tungsten ribbon[J]. *Applied surface science*, 2014, 308: 216-220.
- [15] TANG Q H, ZHOU D, WANG Y L, et al. Laser cleaning of sulfide scale on compressor impeller blade[J]. *Applied surface science*, 2015, 355: 334-340.
- [16] MARTA C, MARGARITA M, MOHAMED O, et al. Effect of wavelength on the laser cleaning of polychromes on wood[J]. *Journal of cultural heritage*, 2003, 4(3): 243.
- [17] ARNOLD N, SCHREMS G, BUERLE D. Ablative thresholds in laser cleaning of substrates from particulates[J]. *Applied Physics A*, 2004, 79(4-6): 729-734.
- [18] KUMAR A, BISWAS D J. Particulate size and shape effects in laser cleaning of heavy metal oxide loose contamination off clad surface[J]. *Optics & laser technology*, 2018, 106: 286-293.
- [19] D'ADDONA D M, GENNA S, GIORDANO A, et al. Laser ablation of primer during the welding process of iron plate for shipbuilding industry[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 33: 464-469.
- [20] GROJO D, BOYOMO-ONANA M, CROS A, et al. Influence of laser pulse shape on dry laser cleaning[J]. *Applied surface science*, 2006, 252(13): 4786-4791.
- [21] LU Y F, TAKAI M, KOMURO S, et al. Surface cleaning of metals by pulsed-laser irradiation in air[J]. *Applied physics A (solids and surfaces)*, 1994, 59(3): 281-288.
- [22] YUE L, WANG Z, LI L. Modeling and simulation of laser cleaning of tapered micro-slots with different temporal pulses[J]. *Optics & laser technology*, 2013, 45: 533-539.
- [23] RODE A V, FREEMAN D, BALDWIN K G H, et al. Scanning the laser beam for ultrafast pulse laser cleaning of paint[J]. *Applied physics A*, 2008, 93(1): 135-139.
- [24] KIM D, OH B, JANG D, et al. Experimental and theoretical analysis of the laser shock cleaning process for nanoscale particle removal[J]. *Applied surface science*, 2007, 253(19): 8322-8327.
- [25] MEJA P, AUTRIC M, ALLONCLE P, et al. Laser cleaning of oxidized iron samples: The influence of wavelength and environment[J]. *Applied physics A*, 1999, 69(s1): 687-690.