

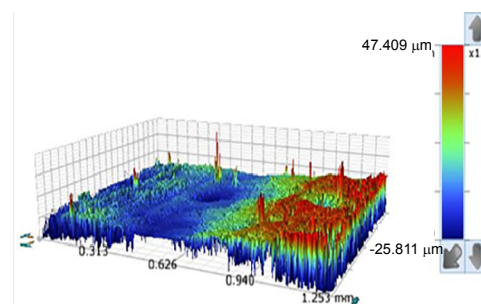


激光功率对不锈钢表面清洗效果影响的研究

陈国星^{1*}, 陆海峰¹, 赵滢², 张惠炜², 魏少舛¹,
季骅¹, 吴树辉¹, 史一岭¹

¹苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004;

²大亚湾核电运营管理有限责任公司, 广东 深圳 518124



摘要: 利用激光清洗技术对不锈钢表面进行清洗试验, 研究不同激光功率(300 W、400 W、500 W)对清洗效果的影响。通过 SEM 和 EDS 分析不锈钢表面清洗前后的表面形貌及成分分布; 利用白光干涉仪检测不锈钢表面粗糙度及清洗厚度。结果表明, 随着激光功率的增加, 不锈钢表面氧化物逐渐分解剥落, 清洗厚度不断加深, 在 500 W 时达到 50 μm, 并且造成基体部分损伤; 粗糙度值先降低后增加, 在 400 W 时达到最低值 0.38 μm。激光清洗的清洗阈值近似为 $3.96 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$, 基体损伤阈值在 $5.52 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 左右, 不锈钢表面氧化层在 400 W 时达到最佳激光清洗效果。

关键词: 激光清洗; 不锈钢氧化层; 激光功率; 粗糙度; 清洗厚度

中图分类号: TN249

文献标志码: A

Effect of power on laser cleaning result of stainless steel surface

Guoxing Chen^{1*}, Haifeng Lu¹, Ying Zhao², Huiwei Zhang², Shaochong Wei¹, Hua Ji¹, Shuhui Wu¹ and Yiling Shi¹

¹Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China; ²Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co., Ltd, Shenzhen 518124, China

Abstract: Laser cleaning technology was used to clean the surface of stainless steel, and the influence of different laser power (300 W, 400 W, 500 W) on cleaning effect was studied. The surface morphology and composition distribution of stainless steel were analyzed by SEM and EDS. The surface roughness and cleaning thickness were detected by White Light Interferometer. The results show that, with the increase of laser power, the oxide of stainless steel decomposes and flakes gradually, and the cleaning thickness keeps deepening and reaches 50 μm at 500 W, which causes partial damage to the matrix. The roughness value decreases firstly and then increases. It reaches a minimum value of 0.38 μm at 400 W. Laser cleaning threshold is approximately $3.96 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$, and damage threshold is about $5.52 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$. The best laser cleaning effect of stainless steel is obtained when the power is 400 W.

Keywords: laser cleaning; stainless steel oxide layer; laser power; roughness; cleaning thickness

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.12.010

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(12): 1217–1224

收稿日期: 2017-10-20; 收到修改稿日期: 2017-11-25

*E-mail: chenguoxing@cgnpc.com.cn

1 引言

激光清洗技术因为其环保、高效的特点,逐渐替代传统的机械法和化学法去污方法,在工业生产、文物修复等领域得到广泛的应用^[1,2]。目前,激光清洗主要以干式和湿式为主。干式激光清洗是指直接以高能量激光照射物体表面,使物体表面污染物受热熔气化并产生超声波振动,达到去污效果;湿式激光清洗是指在物体表面添加化学液体,然后施加高能激光,结合液体与物体表面污染物的相互作用使污染物去除的方法^[3-5]。

目前,国内对于激光清洗的研究主要集中在合金表面除漆^[6,7]、模具表面橡胶层的清理^[8,9]、半导体表面颗粒物的清洁等^[10]方面,对于不锈钢管内部清洁研究

较少。目前管道清洁主要以化学酸碱法为主,但是其对基体腐蚀较大,并产生大量污染。本课题采用激光清洗技术对不锈钢管道进行清洗试验,探究不同的激光功率对于激光清洗效果的影响,并探究其机理。

2 试验方法与设备

试验样品为管道材料 304 不锈钢,成分见表 1。样品尺寸切割为 400 mm×100 mm×3 mm,表面布满因在高温(~1000 °C)环境工作而生成的褐色氧化层,如图 1 所示。

激光清洗试验采用公司自制的激光清洗设备,具体参数见表 2。

激光清洗是利用激光强度高、能量密度大、聚焦性强、方向性好的特点,利用透镜组合将光束聚焦集

表 1 304 不锈钢化学成分(质量分数,%)。

Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel (wt.%).

C	Cr	Ni	Mn	Si	S	Fe
≤0.08	18.0~20.0	8.0~10.0	≤2.0	≤1.0	≤0.03	Bal



图 1 304 不锈钢试样宏观形貌。
Fig. 1 Macroscopic appearance of 304 stainless steel sample.

表 2 试验用激光参数。

Table 2 Laser parameters for test.

参数	值
激光器类型	脉冲
输出中心波长/nm	1064
单脉冲能量/mJ	50
单脉冲宽度/ns	100
功率调节范围/W	100~500
重复频率调节范围/kHz	2~50
转盘速度/(°·h ⁻¹)	0~45
光斑直径/mm	3

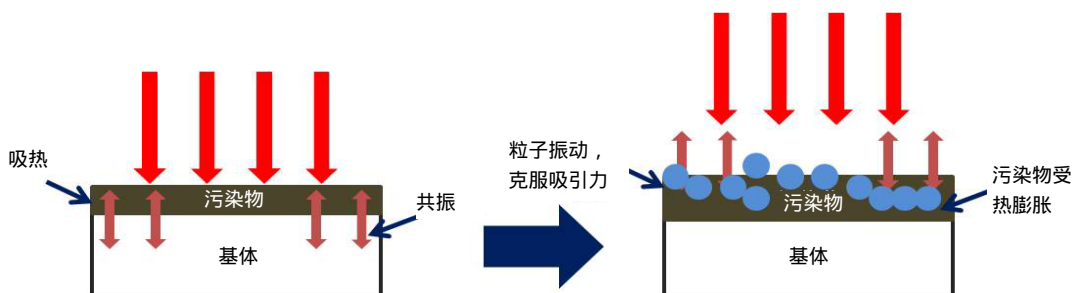


图 2 激光清洗原理图。

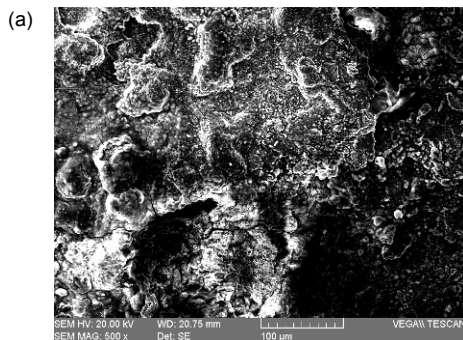
Fig. 2 Schematic diagram of laser cleaning.

中为极小的斑点,然后轰击材料表面^[10,11]。在轰击过程中,激光一方面在材料表面产生力学共振现象,使表面污染物碎裂脱落;另一方面使表面污染层受热膨胀,克服基体对污染粒子的吸附力而蒸发、气化脱离物体表面,其原理图见图 2。激光清洗过程中,清洗阈值和损伤阈值对清洗效果的影响尤为重要^[12-15]。

本试验是对 304 不锈钢氧化试样进行干式激光清洗试验,将试片镶嵌在管道内部,采用旋转式激光进行清洗,其中管道处在转盘上。试验参数为重复频率 10 kHz,转盘速度 30 °/h,扫描次数 5 次,选取 300 W、400 W、500 W 三种输出功率为研究对象,通过 SEM 和 EDS 分析不锈钢表面激光清洗前后的表面形貌和成分分析,采用 BRUKER 表面显微形貌仪对清洗试样进行三维形貌分析,测试其清洗厚度及表面粗糙度,分析不同功率下激光清洗效果。

3 试验结果与分析

图 3 为激光清洗前 304 不锈钢氧化层的表面形貌



及成分分析。由图 3(a)可知,不锈钢经过氧化后,表面氧化层疏松多孔,粗糙不平,形成大量氧化物块状物。根据图 3(b)的成分分析图,发现不锈钢高温氧化后,表面氧化层成分主要以 O, Fe 元素为主,原子数百分比分别为 58.61%及 34.43%,说明此时氧化层主要成份为 Fe 的氧化物。

3.1 300 W 功率时激光清洗效果

图 4 所示为 304 不锈钢氧化层在 300 W 激光功率清洗后的表面形貌及成分分析。由图 4(a)可知,304 不锈钢氧化层经过激光清洗后,表面大块氧化物发生分解,形成球状氧化物。根据图 4(b)的能谱分析结果可以发现,不锈钢表面氧化层经过激光清洗后, Cr、Ni 元素原子百分比比较基体清洗前有所增加,不过仍然维持较少的含量(7.59%, 6.42%)。Fe 和 O 的元素的原子百分比占主要地位,分别为 37.03%和 48.28%,说明此时不锈钢表面经过激光清洗后仍然有氧化层,清洗效果不佳。

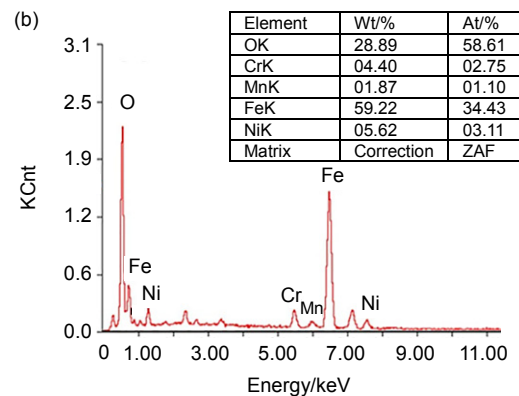


图 3 激光清洗前 304 不锈钢试样表面形貌(a)及成份分析(b)。

Fig. 3 Morphology (a) and composition analysis (b) of 304 stainless steel sample before laser cleaning.

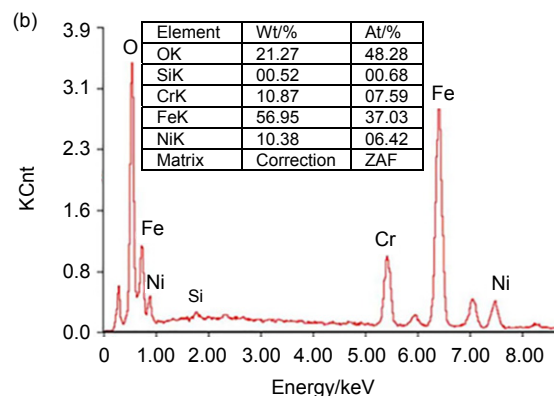
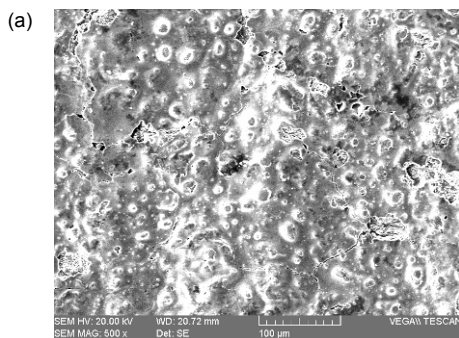


图 4 300 W 激光清洗后 304 不锈钢试样表面形貌(a)及成份分析(b)。

Fig. 4 Morphology (a) and composition analysis (b) of 304 stainless steel sample after laser cleaning at 300 W.

图5为300 W激光清洗后不锈钢表面的三维形貌图。由图5可知,不锈钢表面氧化层在激光清洗后厚度减薄,表面粗糙度也有所降低。根据白光干涉仪测试结果,不锈钢表面氧化层激光清洗前粗糙度 Ra 值为 3.44 μm ,在 300 W 激光清洗下,不锈钢表面氧化层的粗糙度降为 1.02 μm 。不锈钢表面氧化层经过激光清洗后厚度下降 17 μm 左右,而且表面粗糙不平,如图6样品的轮廓线结果所示。结果说明激光清洗没有达到较好的效果。

3.2 400 W 功率时激光清洗效果

图7为304不锈钢氧化层在400 W激光功率清洗后的表面形貌及成分分析。由图7(a)可知,不锈钢表面经过激光清洗后,表面由粗糙变为光滑,氧化物块状物减少。此时不锈钢表面成分由之前的 O、Fe 元素转变为 O、Fe 及 Cr 元素,原子数百分比分别为 57.72%、22.76%及 15.07%,见图7(b),说明表层的氧化物已经

几乎被清洗掉,露出次表层。

图8为400 W激光清洗后不锈钢表面的三维形貌图。根据白光干涉仪测试结果,400 W激光清洗后,不锈钢表面 Ra 值下降到 0.38 μm 。图9为不锈钢试样激光清洗后的表面轮廓线。由图可知,激光清洗的厚度在 40 μm 左右,而且清洗后的表面轮廓比较平整,波动较小,说明此时激光清洗效果良好。

3.3 500 W 功率时激光清洗效果

图10为304不锈钢氧化层在500 W激光功率清洗后的表面形貌及成分分析。由图10(a)可知,激光清洗后表面较400 W时,块状氧化物有所增多,表面粗糙不平。根据图10(b)的成分分析,发现此时 Cr 元素原子百分比进一步增加,达到 19.30%,说明激光清洗已经将不锈钢表面氧化物清洗干净,并清洗部分基体。

图11为500 W激光清洗后不锈钢表面的三维形貌图。根据白光干涉仪测试结果,500 W下激光清洗

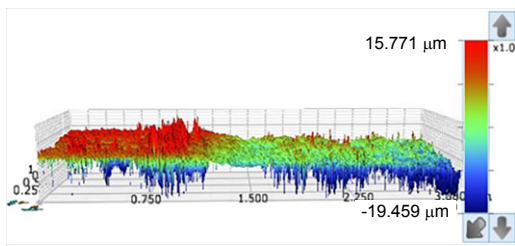


图5 300 W激光清洗后304不锈钢试样的表面三维形貌。

Fig. 5 3D morphology of 304 stainless steel after laser cleaning at 300 W.

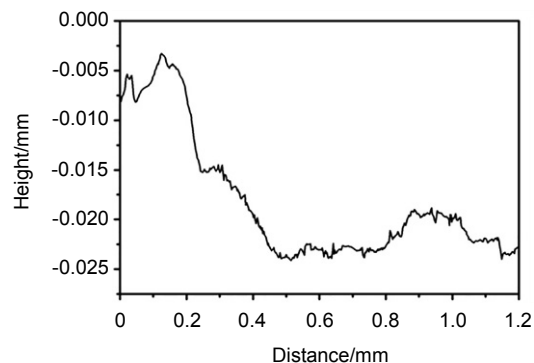


图6 300 W激光清洗后304不锈钢试样的表面轮廓线。

Fig. 6 Outline of 304 stainless steel after laser cleaning at 300 W.

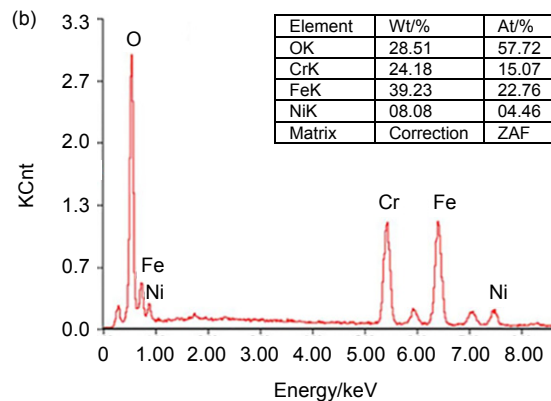
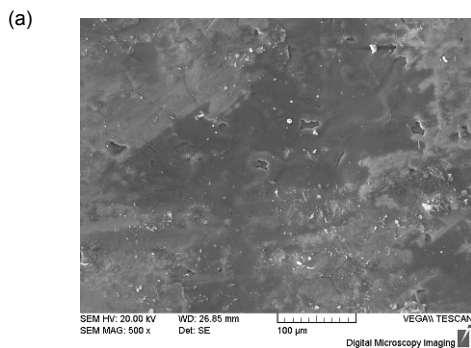


图7 400 W激光清洗后304不锈钢试样的表面形貌(a)及成份分析(b)。

Fig. 7 Morphology (a) and composition analysis (b) of 304 stainless steel sample after laser cleaning at 400 W.

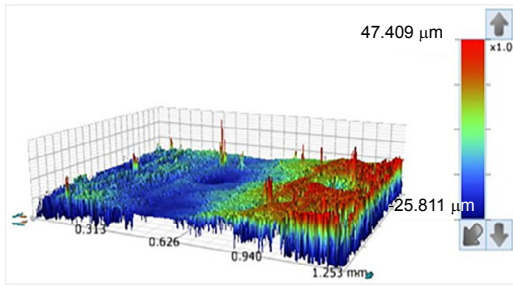


图 8 400 W 激光清洗后 304 不锈钢试样表面三维形貌。

Fig. 8 3D morphology of 304 stainless steel after laser cleaning at 400 W.

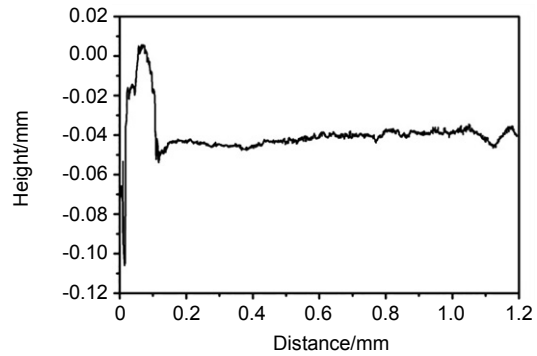


图 9 400 W 激光清洗后 304 不锈钢试样表面轮廓线。

Fig. 9 Outline of 304 stainless steel after laser cleaning at 400 W.

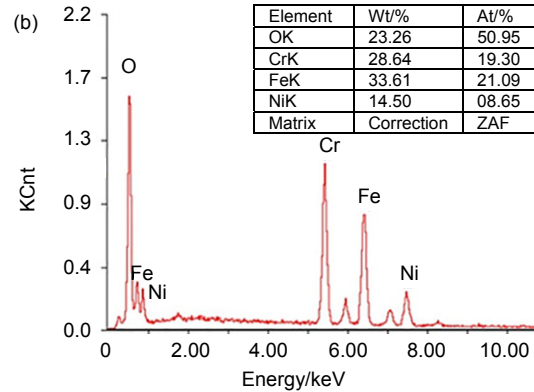
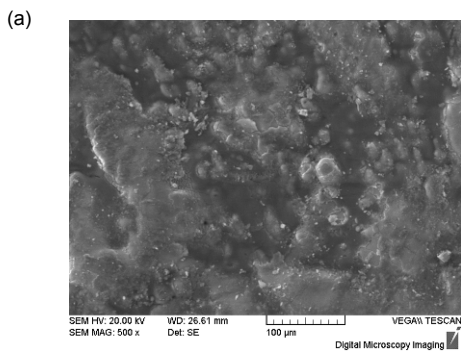


图 10 500 W 激光清洗后 304 不锈钢试样表面形貌(a)及成份分析(b)。

Fig. 10 Morphology (a) and composition analysis(b) of 304 stainless steel sample after laser cleaning at 500 W.

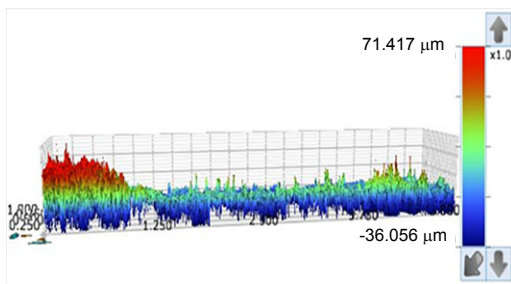


图 11 500 W 激光清洗后 304 不锈钢试样表面三维形貌。

Fig. 11 3D morphology of 304 stainless steel after laser cleaning at 500 W.

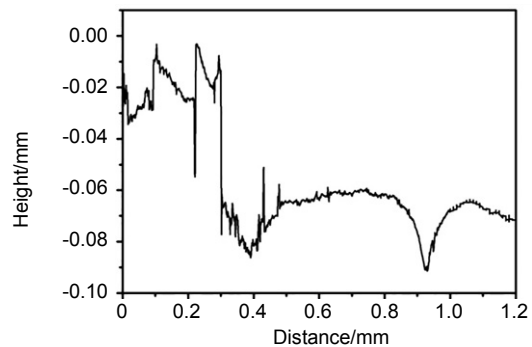


图 12 500 W 激光清洗后 304 不锈钢试样表面轮廓线。

Fig. 12 Outline of 304 stainless steel after laser cleaning at 500 W.

后,不锈钢表面 Ra 值下降到 $0.64 \mu\text{m}$ 。图 12 为不锈钢试样激光清洗后的表面轮廓线。由图可知,激光清洗的厚度在 $50 \mu\text{m}$ 左右,与 400 W 相比,厚度有所增加,但是表面粗糙度较高,凹凸不平。根据分析结果说明此时激光清洗厚度较深,但是效果较 400 W 有所逊色。

4 机理分析

污染物因为受吸附力的作用,牢固地固定在基体表面。在激光清洗过程中,基体表面吸收激光能量,由于激光的瞬态热效应,基体表面污染物受热向外膨

胀,相当于给污染物粒子施加了方向向上的清洗力。当清洗力大于吸附力时,污染物粒子逸出基体表面,说明此时污染物被清洗掉。在实际激光清洗中,清洗力的大小对应激光功率密度。激光功率越大,基体表面升温越快,受热膨胀速度越大,导致清洗力也随之增大。激光功率的公式表示如下:

$$I = \frac{4P}{\pi d^2}$$

其中: P 为激光功率, d 为激光光斑直径^[16,17]。

本实验中,激光光斑直径为 3 mm。当激光功率为 300 W 时,功率密度为 $4.24 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$,此时不锈钢表面仍然留有大量氧化物,表面凹凸不平,粗糙度值较大($1.02 \mu\text{m}$),清洗厚度仅为 $17 \mu\text{m}$,说明 300 W 时的功率密度 $4.24 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 已经超过不锈钢表面的清洗阈值,但是小于基体的损伤阈值;当激光功率为 400 W 时,功率密度为 $5.66 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$,此时不锈钢表面氧化物几乎完全被清洗掉,粗糙度达到最低值

$0.38 \mu\text{m}$,而且此时表面 Cr 元素含量逐渐增加,说明在清洗过程中触碰到基体,因此基体的损伤阈值小于 $5.66 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$;当激光功率为 500 W 时,功率密度为 $7.07 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$,其值更加大于基体损伤阈值,因此导致 Cr 元素含量接近基体成分,清洗厚度也达到 $50 \mu\text{m}$,不锈钢表面粗糙不平,对基体造成一定的损伤。

为了更精确得到不锈钢表面激光清洗阈值和损伤阈值,分别补充进行 250 W 和 280 W、350 W 和 380 W 两组实验。由图 13(a)可知,当激光功率为 250 W 时,不锈钢表面氧化物在激光清洗下,表面出现膨胀,但是没有剥落。从图 13(b)的成分分析所示可以发现,不锈钢表面清洗后 Fe、O 和 Cr 元素含量与清洗前几乎一样,说明此时激光清洗没有发挥效果。图 14(a)为 280 W 激光清洗后不锈钢表面形貌,发现表面块状氧化物开始有所膨胀剥落,不过剥落量有限,清洗后仍然存在较多的氧化物。图 14(b)的成份分析发现 Cr 元素含量增加到 6.39%,说明此时激光清洗开始产生清

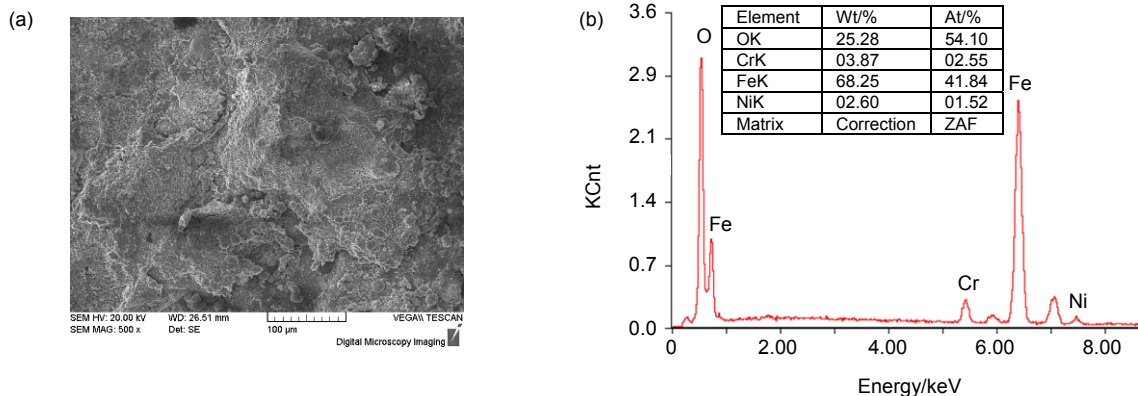


图 13 250 W 激光清洗后 304 不锈钢试样的表面形貌(a)及成份分析(b)。

Fig. 13 Morphology(a) and composition analysis (b) of 304 stainless steel sample after laser cleaning at 250 W.

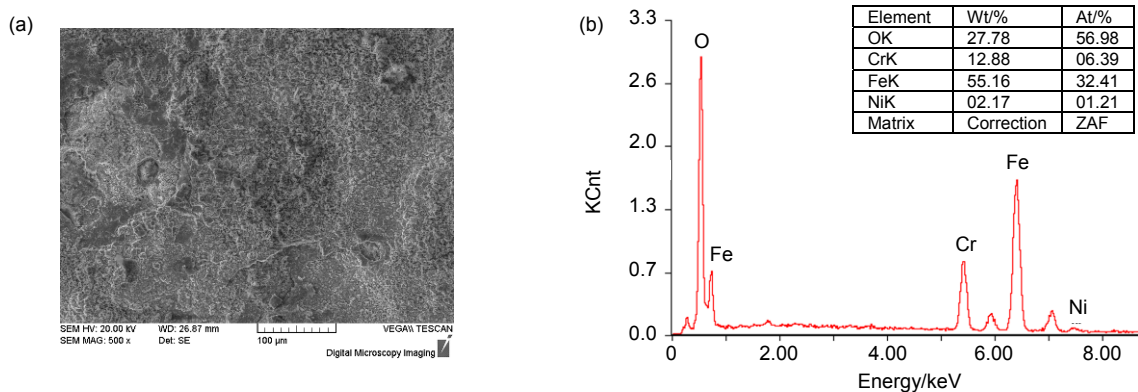


图 14 280 W 激光清洗后 304 不锈钢试样的表面形貌及成份分析。

Fig. 14 Morphology (a) and composition analysis (b) of 304 stainless steel sample after laser cleaning at 280 W.

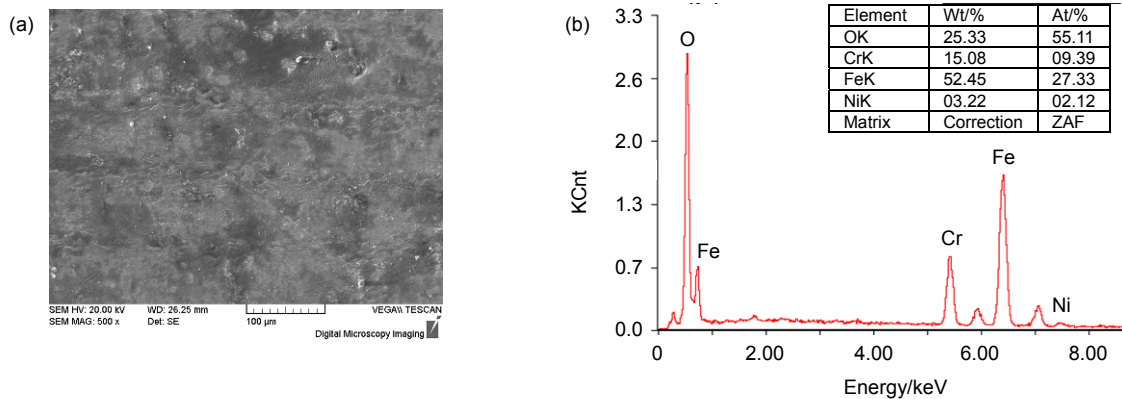


图 15 350 W 激光清洗后 304 不锈钢试样的表面形貌(a)及成份分析(b).

Fig. 15 Morphology (a) and composition analysis (b) of 304 stainless steel sample after laser cleaning at 350 W.

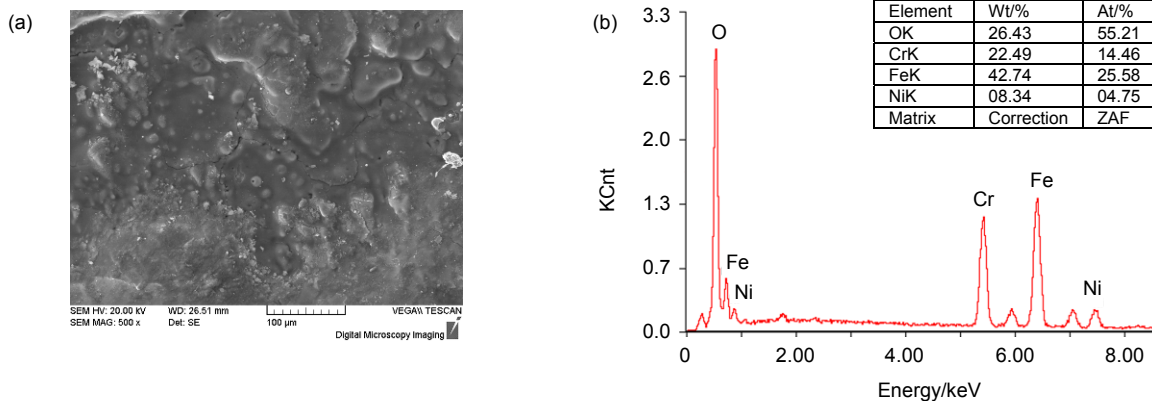


图 16 380 W 激光清洗后 304 不锈钢试样的表面形貌(a)及成份分析(b).

Fig. 16 Morphology (a) and composition analysis (b) of 304 stainless steel sample after laser cleaning at 380 W.

洗效果。因此，可以大致认为不锈钢表面氧化物的清洗阈值接近此时的功率密度，即 $3.96 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 。

图 15(a)为 350 W 激光清洗后不锈钢表面形貌，由图可知，不锈钢表面氧化物不断剥落，较 300 W 时清洗效果更好，但是表面氧化物并未全部消除。成分分析结果发现 Cr 元素含量进一步增加，但表面仍以 Fe 的氧化物为主，说明此时激光清洗并未触及到基体。

当激光功率增加到 380 W 时，不锈钢表面氧化物被大量消除，而且表面出现裂纹，如图 16(a)所示。根据图 16(b)的成分分析得知 Cr 元素含量增加到 14.46%，接近基体元素含量，说明此时激光清洗开始触碰基体。而且此时元素含量与 400 W 时相近，说明二者激光清洗效果差别不大，都是开始清洗到基体，不同的是清洗范围。因此，此时激光功率密度和 400 W 时都可以近似被认为激光清洗的损伤阈值，所以确定不锈钢基体损伤阈值近似为二者功率密度的平均值，即 $5.52 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 左右。

5 结论

1) 不锈钢经过高温氧化后，表面出现以 Fe 的氧化物为主的氧化层，疏松多孔，粗糙不平。经过激光清洗后，不锈钢氧化层表面平滑，基体粗糙度 ($3.44 \mu\text{m}$) 有所下降。激光功率为 400 W 时，粗糙度下降到 $0.38 \mu\text{m}$ ，优于 300 W ($1.02 \mu\text{m}$) 和 500 W ($0.64 \mu\text{m}$)。

2) 随着激光功率的增加，激光清洗厚度不断增加，300 W 时清洗厚度为 $17 \mu\text{m}$ ，400 W 时增加到 $40 \mu\text{m}$ ，500 W 时达到 $50 \mu\text{m}$ 。

3) 300 W 时，清洗后表面成分以 Fe 的氧化物为主，说明此时激光清洗并未碰到基体，氧化层清洗不彻底；400 W 时，清洗后表面成分以 Fe 和 Cr 的氧化物为主，但是 Cr 元素较少，说明表面氧化物基本被清洗干净，露出基体表面；500 W 时，Cr 元素含量进一步增加，表明激光清洗时对基体造成一定损伤。

4) 不锈钢表面激光清洗的清洗阈值接近 3.96×10^3

W/cm^2 , 基体损伤阈值为 $5.52 \times 10^3 W/cm^2$ 左右。综合比较不同功率的清洗效果,发现当激光功率为 400 W, 重复频率为 10 kHz, 转盘速度为 $30^\circ/h$, 扫描次数 5 次时, 不锈钢表面氧化层激光清洗达到最佳效果。

5) 激光清洗作为金属表面氧化物去除的新方法前景光明, 但是为了达到最佳的工艺效果, 还需进行深入试验研究。而且, 相较于之前激光清洗油漆、橡胶的等材料, 金属氧化物和金属基体差别较小, 因此在激光照射下, 氧化物与基体间的蒸发阈值和损伤阈值较为接近。所以在进行金属氧化物激光清洗时, 必须合理控制工艺参数, 做好成分检测, 提高工作精度和效率。

参考文献

- Ruan Jingyun. On the laser cleaning applications in relics maintenance[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2014(22): 1-2.
阮競芸. 论激光清洗在文物维修中的应用[J]. *科技与创新*, 2014(22): 1-2.
- Ye Yayun, Yuan Xiaodong, Xiang Xia, et al. CO2 laser cleaning of dimethylsilicone contamination on gilded film surface[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2010, 22(5): 968-972.
叶亚云, 袁晓东, 向霞, 等. 用激光清洗金膜表面硅油污染物[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(5): 968-972.
- Song Feng, Liu Shujing, Yan Boxia. Laser cleaning[J]. *Cleaning World*, 2004, 20(5): 43-48, 60.
宋峰, 刘淑静, 颜博霞. 激光清洗——富有前途的环保型清洗方法[J]. *清洗世界*, 2004, 20(5): 43-48, 60.
- Pleasant S, Kane D M. Laser cleaning of alumina particles on glass and silica substrates: Experiment and quasistatic model[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(11): 8862-8866.
- Chen Lin, Yang Yongqiang. Laser cleaning technology and its applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 274-277.
陈林, 杨永强. 激光清洁技术及其应用[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(3): 274-277.
- Li Xiaoguang, Huang Tingting, Chong Angwei, et al. Laser cleaning of steel structure surface for paint removal and repaint adhesion[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 340-344.
- Shi Shudong, Du Peng, Li Wei, et al. Research on paint removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 58-64.
施曙东, 杜鹏, 李伟, 等. 1064 nm 准连续激光除漆研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 58-64.
- Zhou Guilian, Zhao Haixia. New technology of laser cleaning tyre mould[J]. *Special Purpose Rubber Products*, 2003, 24(5): 39-41.
周桂莲, 赵海霞. 激光清洗轮胎模具新工艺[J]. *特种橡胶制品*, 2003, 24(5): 39-41.
- Zhou Guilian, Sun Haiying, Wang Chuansheng. Research on laser cleaning process to rubber mold[J]. *Special Purpose Rubber Products*, 2008, 29(6): 34-36.
周桂莲, 孙海迎, 汪传生. 橡胶模具激光清洗的工艺研究[J]. *特种橡胶制品*, 2008, 29(6): 34-36.
- Wu Dongjiang, Xu Yuan, Wang Xuyue, et al. Experimental and theoretical study on laser cleaning Al_2O_3 particle on silicon wafer surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(5): 764-770.
吴东江, 许媛, 王续跃, 等. 激光清洗硅片表面 Al_2O_3 颗粒的试验和理论分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 764-770.
- Wang Hongrui. Principle and applied research on laser cleaning[J]. *Cleaning World*, 2006, 22(9): 20-23.
王宏睿. 激光清洗原理与应用研究[J]. *清洗世界*, 2006, 22(9): 20-23.
- Siano S, Fabiani F, Pini R. Determination of damage thresholds to prevent side effects in laser cleaning of pliocene sandstone of Siena[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2000, 1(S1): S47-S53.
- Tan Donghui, Lu Dongsheng. Study of laser cleaning threshold and damage threshold[J]. *Laser & Optonics Progress*, 1997, 34(7): 17-20.
谭东晖, 陆冬生. 激光清洗阈值和损伤阈值的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 1997, 34(7): 17-20.
- Guo Weixi, Hu Qianwu, Wang Zemin, et al. Paint removal research on high power pulse TEA CO_2 laser[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, 4(3): 32-35.
郭为席, 胡乾午, 王泽敏, 等. 高功率脉冲 TEA CO_2 激光除漆的研究[J]. *光学与光电技术*, 2006, 4(3): 32-35.
- Chen Jufang, Zhang Yongkang, Xu Renjun, et al. Experimental research of paint removal with a fast axis flow CO_2 laser[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 64-66, 70.
陈菊芳, 张永康, 许仁军, 等. 轴快流 CO_2 激光脱漆的实验研究[J]. *激光技术*, 2008, 32(1): 64-66, 70.
- Kong Lingbing. Study on the mechanism of cleaning rubber products mold by laser[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2008.
孔令兵. 激光清洗橡胶制品模具机理的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2008.
- Wu Qiang, Yang Yongqiang, Xu Lanying. Determination of critical power density of laser deep-penetration welding[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 37(8): 71-75.
伍强, 杨永强, 徐兰英. 激光深熔焊接下临界功率密度的确定[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(8): 71-75.