DOI:10.16136/j.joel.2023.06.0377

# 纳秒脉冲激光清洗石化设备对清洗表面的影响

王书文,王 涛\*,李道齐,杨紫璠,李宇彬

(河北工业大学 机械工程学院,天津 300401)

摘要:采用纳秒脉冲激光对石化设备普遍使用的 20 钢表面锈蚀层以及油污进行了激光清洗试验,通过正交实验法得到优化后的激光清洗工艺参数,在激光功率18W,激光脉冲重复频率 75 kHz,扫描速度3000 mm/s的清洗工艺参数下可有效去除20 钢表面的锈蚀层;在激光功率 20 W,激光脉冲重复频率 75 kHz,扫描速度2250 mm/s的清洗工艺参数下可有效去除20 钢表面附着的油污。分析了激光清洗前后材料表面形貌的变化,研究了激光清洗前后表面的显微硬度以及耐腐蚀性,结果表明:激光清洗可以在不改变材料的耐腐蚀性能的同时提升材料表面的显微硬度,从而达到理想的激光清洗效果。

关键词:激光清洗;石化设备;正交实验;表面形貌;显微硬度;耐腐蚀性中图分类号:TN249 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2023)06-0644-10

## Effect of nanosecond pulse laser cleaning petrochemical equipment on cleaning surface

WANG Shuwen, WANG Tao\*, LI Daoqi, YANG Zifan, LI Yubin (College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The nanosecond pulse laser is used to clean the corrosion layer and oil stain on the surface of 20 steel commonly used in petrochemical equipment. The optimized laser cleaning process parameters are obtained by orthogonal experiment. Under the cleaning process parameters of laser power 18 W, laser pulse repetition frequency 75 kHz, scanning speed 3000 mm/s, the rust layer on the surface of 20 steel can be effectively removed. Under the cleaning process parameters of laser power 20 W, laser pulse repetition rate 75 kHz and scanning speed 2250 mm/s, the oil stains attached to the surface of 20 steel can be effectively removed. The changes of material surface morphology before and after laser cleaning are analyzed, and the surface microhardness and corrosion resistance before and after laser cleaning are studied. The results show that laser cleaning can improve the microhardness of material surface without changing the corrosion resistance of material, so as to achieve the ideal laser cleaning effect.

**Key words:** laser cleaning; petrochemical equipment; orthogonal experiment; surface topography; microhardness; corrosion resistance

## 0 引 言

石化设备往往是露天集中安置,时间一长,一些铁制或钢制设备表面会生锈,而且在设备表面会沉积一层厚厚的油污。因此,在设备运行一段时间后就要定期对这些锈迹和油污进行清洗。目前石化领域应用最为广泛的两种传统清洗方法:机械清洗和化学清洗,其清洗效率低,且会污染环

境和影响设备的使用寿命。激光清洗是利用高能量密度和高频率的激光束照射被清洗物体的表面,进而使表面的污垢吸收能量从而破坏污垢与基材之间的结合力,使污垢脱离基材表面<sup>[1]</sup>。激光清洗具有许多优点,例如:无机械接触<sup>[2]</sup>、环境污染小、易于实现自动化控制等。目前,激光清洗技术在很多领域都被研究,并取得了一定的成果。MAFFINI等<sup>[3]</sup>对由氧化钨化合物污染的托卡马

<sup>\*</sup> **E-mail**: wtao 1@163. com

克第一镜进行了激光清洗实验研究。分析了不同 激光波长以及多重污染/清洗循环对清洗过程的 影响,从镜面反射率恢复和镜面完整性方面评价 了清洗效果。结果表明,激光清洗是清洗第一镜 非常有潜力的手段。LU 等[4] 采用紫外激光清洗 微生物污垢表面,结果发现,采用纳秒紫外激光清 洗可以有效去除铁基体表面的微生物污垢,并可 以改善材料表面的耐腐蚀性能,从理论上验证了 紫外激光清洗微生物污垢表面的可行性。LI等[5] 利用纳秒脉冲激光对橡胶叠层金属阀进行了清 洗,通过对比干式激光清洗发现,湿式激光清洗方 法可以有效地减少基材表面的热积累,且清洗后 对表面影响较小,进而发现一种高效、高质量的激 光橡胶清洗方法。陈翊坤等[6]采用两种不同的脉 冲激光对航空发动机零件表面进行了清洗,结果 发现纳秒激光更适合清洗油脂类结合力较强、厚 度较厚的污染物,飞秒激光更适合清洗积碳类结 合力较弱、厚度较薄的污染物。

目前,激光清洗已经被应用到许多领域,如模 具领域、高铁船舶领域、文物保护以及航空航天领 域等,但是,作为国民经济支柱的石化企业对激光 清洗的应用却存在一定的不足[7]。碳钢作为工业 生产领域中最为常用的金属材料[8],低碳钢更是 因其强度低、塑性好、冷冲压和焊接性能好等优点 被广泛应用在石油化工领域设备的壳体、接管、管 板、法兰、顶盖等部件的生产中[9]。然而,低碳钢 在使用过程中极易发生锈蚀,且在石化领域的工 作环境中表面极易沉积大量尘垢、油垢等杂质,这 类污染物的出现会对设备的稳定运行造成安全隐 患。因此,在设备使用过程中必须定期对表面的 这些污染物进行清洗,使被清洗过的表面满足质 量要求,延长工件的使用寿命。传统清洗方法已 不能满足我国日益严苛的环保法规要求[10],因 此,开发激光清洗在石化领域的应用具有广阔的 前景。但激光清洗后材料的被清洗表面的表面形 貌以及性能会发生怎样的变化却不得而知,为此, 本文将选用20钢作为试验对象,对其表面进行激 光除锈和激光除油污试验,采用正交实验法得到 优化参数,并在激光清洗后对清洗表面的表面形 貌以及表面显微硬度和耐腐蚀性进行分析,来验 证激光清洗在石化领域应用的可行性。

## 1 试验方法

### 1.1 试验设备

本次试验采用无锡津天阳激光电子有限公司生产的激光清洗机器,可以用作激光打标、激光雕刻和激光清洗等加工工作,设备型号 RMZ-100,额定功率

30 W,峰值功率可达 7-9 kW,如图 1 所示。



图 1 激光清洗试验设备

Fig. 1 Laser cleaning equipment

与大多数实验装置一样,激光清洗设备也是由控制系统和工作系统组成,如图 2 所示。其中控制系统由计算机硬件和软件构成,在工作过程中,通过计算机控制系统控制设备的工作,主要是控制激光器输出、激光器输出功率百分比、光斑大小、工作台和振镜的运动等。

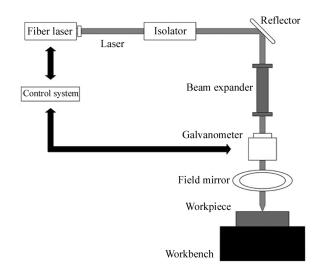


图 2 激光清洗设备示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser cleaning equipment

工作系统包括激光器、激光扫描系统等。激光器是光源,输出激光通过光纤依次进入隔离器、反射镜等,得到均匀平行的激光束,然后光束投射到振镜上,经反射到达工作台形成扫描点。激光扫描系统

由振镜和场镜组成,实验采用的振镜和场镜的波长是 1064 nm。控制系统可以通过软件选择各种加工参数的配比,软件采用的是由金橙子公司制作的 EZcad 软件,其操作方便、工作高效并且稳定。可以通过软件调整激光器输出功率的百分比、振镜的扫描速度、光斑大小等参数。

#### 1.2 试验材料

本次激光除锈与激光除油污试验所选用的激光 清洗对象均为20钢板。20钢的质量分数见表1。 激光除锈试验中采用的20钢板规格为100 mm ×150 mm×3 mm,用 80 目的砂纸打磨表面,以去除表面的氧化物等其他杂质,试验样品如图 3(a)所示。将表面打磨处理后,放置在潮湿环境中使其缓慢生锈,图 3(b)显示样品表面整体锈蚀,图 3(c)为表面锈层的微观形貌。

激光除油污试验中采用的20钢板规格为50 mm×200 mm×10 mm,表面附着大量机油、灰尘等混合而成的黑色油污,以此模拟石化设备表面的油污,试验样品如图4(a)所示,图4(b)所示为其表面油污在扫描电子显微镜(scanning electron micro-

表 1 20 钢质量分数

Tab. 1 Mass fraction of 20 steel

Fe	С	Si	P	Mn	S
Bal.	0.17%-0.23%	0.17%-0.37%	<0.035%	0.35%-0.65%	<0.035%

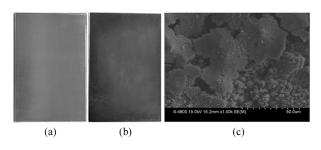


图 3 激光除锈试验样品:(a) 干净的 20 钢板; (b) 表面锈蚀的 20 钢板;(c) 锈层微观形貌 Fig. 3 Experimental sample of laser derusting: (a) Clean 20 steel plate; (b) 20 steel plate with rusty surface; (c) Microstructure of rust layer

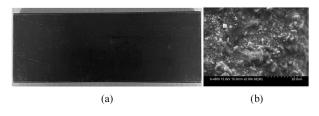


图 4 激光除油污试验样品:(a)含油污的 20 钢板; (b)油污微观形貌

Fig. 4 Laser degreasing test sample:
(a) 20 steel plates containing oil stain;
(b) Oil stain microscopic appearance

scope, SEM)下所呈现的表面微观形貌。

#### 1.3 试验方案

试验分为激光除锈和激光除油污两部分,均采用三因素三水平的正交实验法,其余激光清洗工艺参数保持相同,清洗路径为"之"字型,激光扫描次数

2次,在正交实验开始前通过单因素试验法确定了正 交实验各因素的因素水平范围,采用 L<sub>3</sub>(3<sup>3</sup>)来安排 实验。

对激光除锈和激光除油污除锈试验的因素水平进行随机排序与分配,结果如表2和表3所示。

表 2 除锈试验因素水平表

Tab. 2 Factors and levels of rust removal test

Level	A Power /W	B Frequency /kHz	C Scanning speed /(mm/s)
1	15	70	2 500
2	18	75	3 000
3	20	80	3 500

表 3 除油污实验因素水平表

Tab. 3 Factors and levels of degreasing experiment

Level	A Power /W	B Frequency /kHz	C Scanning speed /(mm/s)
1	15	70	2 250
2	18	75	2 750
3	20	80	3 250

根据因素水平表,将各个因素放入正交表相应 列,水平对号入座,列出试验方案,见表4和表5。

在对实验材料进行锈迹和油污的激光清洗后,分别测定清洗后的表面性能,利用表面形貌仪和 SEM 进行表面微观形貌的观察;采用 X 射线能谱分析仪(EDS)测定清洗前后的表面元素分布;采用显微硬度计测定清洗前后材料显微维氏硬度的变化;采用电化学工作站测定试样清洗前后表面的耐腐蚀

性。配置 3.5% NaCl 溶液作为电解液,采用三电极恒电位法测定极化曲线,其中参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极,工作电极分别为由激光清洗后的 20 钢与 80 目砂纸打磨的 20 钢基材所制成的尺寸为 10 mm×20 mm 的试样。设置电化学工作站的扫描电压范围为-1.6-0.3 V,扫描速度为1 mV/s,采样频率为 1.0 Hz。

表 4 除锈试验方案

Tab. 4 Rust removal test scheme

Test number	A/W	B/kHz	C/(mm/s)	Test scheme
1	15	70	2 500	A1B1C1
2	15	75	3 000	A1B2C2
3	15	80	3 500	A1B3C3
4	18	70	3 000	A2B1C2
5	18	75	3 500	A2B2C3
6	18	80	2 500	A2B3C1
7	20	70	3 500	A3B1C3
8	20	75	2 500	A3B2C1
9	20	80	3 000	A3B3C2

表 5 除油污试验方案

Tab. 5 Oil stain removal test scheme

Test number	A/W	B/kHz	C/(mm/s)	Test scheme
1	15	70	2 250	A1B1C1
2	15	75	2 750	A1B2C2
3	15	80	3 250	A1B3C3
4	18	70	2 750	A2B1C2
5	18	75	3 250	A2B2C3
6	18	80	2 250	A2B3C1
7	20	70	3 250	A3B1C3
8	20	75	2 250	A3B2C1
9	20	80	2 750	A3B3C2

### 2 试验结果与分析

#### 2.1 试验结果

按正交表中各试验号中规定的水平组合进行多次重复试验,试验后利用表面粗糙度仪对激光清洗后的表面进行粗糙度测试,并将得到的表面粗糙度值填写在正交表的最后一列进行极差分析,实验结果如表6和表7所示。

对于激光清洗试验而言,无论是激光除锈还是激光除油污,清洗后的表面粗糙度 (Ra)越小越好,最优方案的确定则是指标越小越好。根据每个因素对 Ra 影响的平均值(k),可以确定两组正交实验最优方案,其中,激光除锈试验最优方案为:功率 18

W,频率75 kHz,扫描速度3000 mm/s(激光能量密度3.06 J/cm²);激光除油污最优方案为:功率20 W,频率75 kHz,扫描速度2250 mm/s(激光能量密度3.39 J/cm²)。从两组试验表中可以看出,两组试验的最优方案并不在试验方案表中,这也从侧面验证了正交实验的科学性,在补作两组最优方案试验后,两组试验的最终清洗效果如图5所示。

表 6 激光除锈试验结果

Tab. 6 Test results of laser derusting

Test number	A/W	B/kHz	C/(mm/s)	Ra
1	15	70	2 500	2.637482
2	15	75	3 000	2.28901
3	15	80	3 500	3.96777
4	18	70	3 000	1.850052
5	18	75	3 500	1.980352
6	18	80	2 500	3.380774
7	20	70	3 500	2.798904
8	20	75	2 500	2.348718
9	20	80	3 000	2.259174
k1	2.965	2.429	2.789	
k2	2.404	2.206	2.133	
<i>k</i> 3	2.469	3.203	2.916	
Delta	0.561	0.997	0.783	
Factor ranking			B > C > A	

Optimal Power:18 W; Frequency:75 kHz; Scanning speed: scheme 3 000 mm/s(Energy density:3.06 J/cm²)

表 7 激光除油污试验结果

Tab. 7 Results of laser degreasing test

Test number	A/W	B/kHz	C/(mm/s)	Ra		
1	15	70	2 250	4.142978		
2	15	75	2 750	3.913508		
3	15	80	3 250	4.737464		
4	18	70	2 750	6.307958		
5	18	75	3 250	3.43643		
6	18	80	2 250	4.553872		
7	20	70	3 250	4.73568		
8	20	75	2 250	3.969042		
9	20	80	2 750	3.774906		
k1	4.265	5.062	4.222			
k2	4.766	3.773	4.665			
<b>k</b> 3	4.16	4.355	4.303			
Delta	0.606	1.289	0.443			
Factor ranking			B > A > C			

Optimal Power:20 W; Frequency:75 kHz; Scanning speed: scheme 2 250 mm/s(Energy density:3, 39 J/cm²)

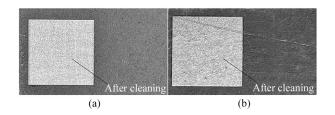


图 5 正交试验清洗效果:(a) 激光除锈正交实验; (b) 激光除油污正交实验

Fig. 5 Cleaning effect of orthogonal test:

- (a) Orthogonal experiment of laser derusting;
- (b) Orthogonal experiment of laser degreasing

#### 2.2 表面形貌分析

对于未经激光清洗的锈蚀试样表面,在超景深显微镜下观察可以看到,在基体表面附着有大量凹凸不平的红棕色金属氧化物,如图 6(a)所示;在 SEM 的观察下可发现,这些红棕色金属氧化物结构疏松,且锈层多从表面向空洞内生长,表面的锈层多呈现片状,在片状锈层下是形状如菌落的锈,如图6

(b) 所示;通过 X 射线 EDS 分析后可知,这些金属氧化物中氧元素含量占比最高,约为 60.04%,铁元素含量约为 22.68%,如图 6(c) 所示。

图 7 为对试样进行激光除锈后的表面形貌,在 超景深显微镜下观察,对比清洗前试样表面,可以看 到表面锈迹基本被清除,试样表面显现金属光泽,同 时观察到表面有沟壑,如图 7(a)所示,这说明表面出 现了熔化烧蚀现象;在 SEM 下观察可以更明显地看 到,基体表面被激光打出类似水滴滴落的痕迹,可清 晰地看到激光的光斑搭接情况,如图 7(b)所示,进一 步证实了激光清洗会改变基体的表面形貌,造成表 面熔化烧蚀的效果。通过 X 射线 EDS 分析元素含 量后,对比清洗前试样元素含量可以发现,氧元素含 量占比明显减少,从清洗前的60.04%降低到 5.57%,铁元素含量占比明显提升,从清洗前的 22.68%提升到 77.25%,如图 8 所示,证实基体表面 的金属氧化物含量显著减少,进一步证实利用激光 对石化设备表面的锈迹进行清洗的方法是行之有 效的。

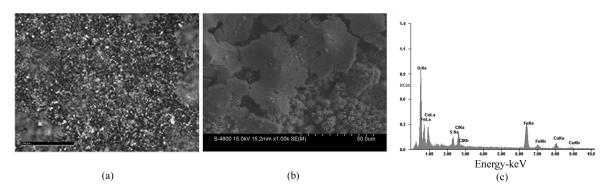


图 6 20 钢锈层的表面形貌与物相:(a) 宏观形貌;(b) SEM 形貌;(c) EDS 谱

Fig. 6 Surface morphology and phase of 20 steel rust layer: (a) Macro morphology; (b) SEM morphology; (c) EDS spectrum

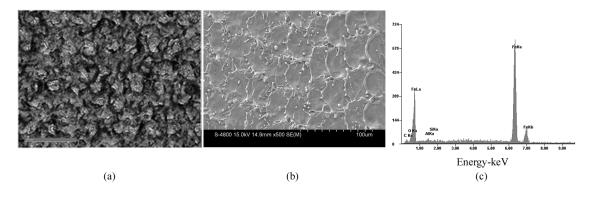


图 7 激光除锈试验表面形貌分析:(a) 宏观形貌;(b) SEM 形貌;(c) EDS 谱

Fig. 7 Surface morphology analysis of laser derusting test; (a) Macro morphology; (b) SEM morphology; (c) EDS spectrum

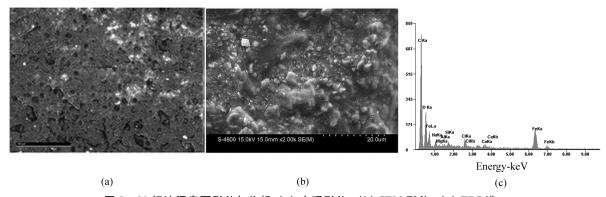


图 8 20 钢油污表面形貌与物相:(a) 宏观形貌; (b) SEM 形貌; (c) EDS 谱

Fig. 8 Surface morphology and phase of 20 steel oil stain; (a) Macro morphology; (b) SEM morphology; (c) EDS spectrum

对于未经激光清洗的除油污试样表面,在超景深显微镜下观察可以看到,基体表面附着有大量棕褐色乃至黑色的油污,在油污下层还可观察到有少量棕黄色乃至红棕色的锈迹存在,如图 8(a)所示;在 SEM 的观察下可发现,不同于生锈表面疏松多孔的结构,油污试样表面呈现较多颗粒状,如图 8(b)所示,应是油污裹挟着灰尘等杂质附着在机体表面;通过 X 射线 EDS 分析后可知,试样表面的碳元素和氧元素的含量占比最高,分别为 70.71%和 23.04%,铁元素含量仅占总含量的 5.07%,如图 8(c)所示。

图 9 为对试样进行激光除油污后的表面形貌,同样在超景深显微镜下观察并与未清洗试样表面做对比,可发现试样表面附着的油污被大面积清除,极

少量部位仍有残留,是油污粘性较大且厚度不均匀所导致的,如图 9(a)所示;在 SEM 的观察下可发现,同激光除锈后的表面一样,激光除油污后的表面也出现了类似水滴滴落的熔化烧蚀现象,如图 9(b)所示,由此可推断出激光清洗石化设备确实会改变设备的表面形貌,造成机体表面的熔化烧蚀。利用 X 射线 EDS 对除油污后的表面进行元素分析可知,对比清洗前,碳氧元素的含量占比明显下降,碳元素含量占比由清洗前的 70.71%下降到 17.93%,氧元素含量占比由清洗前的 23.04%下降到 9.42%,铁元素含量占比明显提升,由清洗前的5.07%提升至70.62%,如图 9(c)所示,进一步证实利用激光对石化设备表面的油污进行清洗的方法是行之有效的。

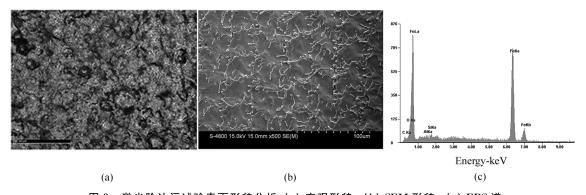


图 9 激光除油污试验表面形貌分析:(a) 宏观形貌;(b) SEM 形貌;(c) EDS 谱

Fig. 9 Surface morphology analysis of laser degreasing test: (a) Macro morphology; (b) SEM morphology; (c) EDS spectrum

激光清洗是通过激光光斑依次搭接之后作用于 机体表面之上工作的[11]。图 10 所示为光斑搭接示意图,光斑的搭接率决定着激光的分布情况,其中, 搭接率分别包括横向搭接率  $\varphi_x$  和纵向搭接率  $\varphi_y$ ,其 计算如式(1)和式(2)所示:

$$\varphi_{x} = \left(1 - \frac{\mathrm{d}x}{2\omega}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{v}{2\omega \cdot f}\right) \times 100\% , \qquad (1)$$

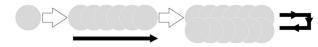


图 10 光斑搭接示意图

Fig. 10 Schematic diagram of spot lapping

$$\varphi_{y} = \left(1 - \frac{\mathrm{d}y}{2\omega}\right) \times 100\% , \qquad (2)$$

式中,dx 表示在扫描方向上的相邻光斑的距离,v 表示激光的扫描速度,f 表示激光的频率,dy 表示纵向相邻光斑的距离, $\omega$  表示激光的光斑半径[12]。

从公式可以看出,横向搭接率与激光的扫描速度和频率有关,而纵向搭接率取决于纵向相邻光斑的距离,与激光的扫描间距有关。在激光除锈试验中,激光的横向搭接率 $\varphi_{x1}$ 为20%,纵向搭接率 $\varphi_{y1}$ 为50%;激光除油污试验所用的激光的横向搭接率 $\varphi_{x2}$ 为40%,纵向搭接率 $\varphi_{y2}$ 为30%,将图7(b)与图9(b)中的图片进一步放大可以清晰地看到光斑搭接的效果,如图11所示。光斑搭接率越高,激光作用在基体表面的时间也就越长,这使得基体表面材料吸收了较多的能量,从而达到了熔化以及相变所需的温度[13]。

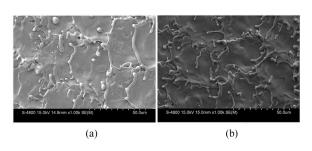


图 11 光斑搭接效果图:(a) 除锈试验光斑搭接效果图; (b) 除油污试验光斑搭接效果图

Fig. 11 Effect diagram of spot lapping:

- (a) Effect drawing of spot lapping in rust removal test;
- (b) Effect drawing of spot lapping in degreasing test

#### 2.3 显微硬度分析

利用显微硬度计对初始材料表面以及激光除锈 后和激光除油污后的试样表面进行显微维氏硬度测 试,结果如图 12 所示。对比图中的数据可发现,初 始材料表面硬度值变化不明显,而对表面进行激光 清洗后,表面的硬度值变化较大,但均高于初始材料 表面的显微维氏硬度,对6次测量数据取平均值,通 过计算可得到,激光除锈后的表面显微硬度增加了 31.89%,激光除油污后的表面显微硬度增加了 27.56%。经激光作用后的表面会出现重熔现象并 产生带有褶皱的且均匀分布着间隙的硬化层,是激 光冲击作用引起基材表面金属流动堆积造成的,产 生的硬化层和层间隙解释了激光清洗后表面显微维 氏硬度值变化较大的现象[14],而张若楠等[15]提出, 在对钢材进行激光清洗后,清洗层的晶粒组织与靠 近基材中心处相比,会出现明显的晶粒细化,显微硬 度显著增强,由此可以推断,对比原始基材,激光清

洗能够显著改善基材清洗层的显微硬度。综上所述,激光清洗不仅可以有效去除 20 钢表面的锈蚀层和油污,还可以使 20 钢表面显微硬度得到强化。

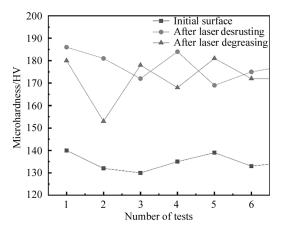


图 12 激光清洗后表面硬度对比

Fig. 12 Comparison of surface hardness after laser cleaning

#### 2.4 耐腐蚀性分析

图 13 展示的是 20 钢初始样品以及激光除锈后和激光除油污后 20 钢的极化曲线图。从图中不同样品极化曲线分布可以看出,在进行激光清洗前后,样品的耐腐蚀性并未发生明显改变。20 钢初始样品经 80 目砂纸打磨处理后的自腐蚀电流密度为 2.99×10<sup>-5</sup> A·cm<sup>-2</sup>,在表面锈蚀后进行激光除锈处理,其自腐蚀电流密度为 1.83×10<sup>-5</sup> A·cm<sup>-2</sup>,在表面含有油污后进行激光除油污处理,其自腐蚀电流密度为 3.32×10<sup>-5</sup> A·cm<sup>-2</sup>,如图 14 所示。

自腐蚀电流密度反应了材料腐蚀速度的快慢, 自腐蚀电流密度值越小,材料腐蚀的越慢,耐腐蚀性 越好,从不同样品的极化曲线分布以及自腐蚀电流

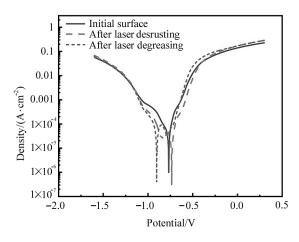


图 13 激光清洗对 20 钢表面极化曲线的影响 Fig. 13 Effect of laser cleaning on surface polarization curve of 20 steel

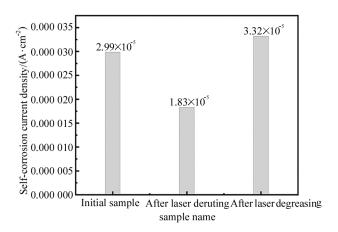


图 14 激光清洗对 20 钢表面自腐蚀电流密度的影响 Fig. 14 Effect of laser cleaning on self corrosion current density of 20 steel surface

密度可以看出,激光清洗后的 20 钢表面的耐腐蚀性与初始材料表面的耐腐蚀性未发生明显变化。激光除锈后的 20 钢表面耐腐蚀性稍有增大,而激光除油污后的表面耐腐蚀性稍有减小,究其原因,EVGENY等[16]发现,相同的材料,其表面粗糙度越大,其表面能相对较高,因此处于更不稳定状态,从而使表面更易被腐蚀。两组激光清洗 20 钢表面与初始表面宏观形貌如图 15 所示,初始表面经过 80 目砂纸打磨处理,如图 15(a)所示,从图中以及前文分析可知,在对20 钢表面进行激光清洗后,表面均会产生不同程度的烧伤,由于激光除油污试验所采用的激光能量密度较大,为 3. 39 J/cm²,因此表面烧伤程度较大,如图 15(c)所示,而激光除锈试验所采用的激光能量密度相对较小,为3.06J/cm²,表面烧伤程度相对较

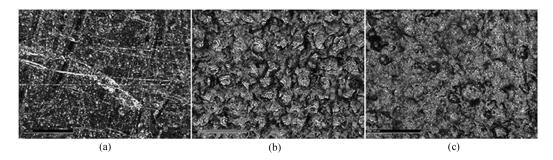


图 15 激光清洗前后表面宏观形貌对比:(a) 初始表面;(b) 除锈后表面;(c) 除油污后表面 Fig. 15 Comparison of surface macro morphology before and after laser cleaning:(a) Initial surface; (b) Surface after rust removal; (c) Surface after degreasing

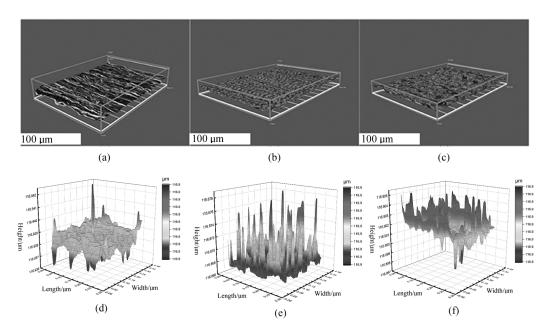


图 16 激光清洗前后表面三维形貌对比:(a) 初始表面;(b) 除锈后表面;(c) 除油污后表面 Fig. 16 Comparison of three-dimensional surface morphology before and after laser cleaning: (a) Initial surface; (b) Surface after rust removal; (c) Surface after degreasing

小,如图 15(b)所示。使用超景深显微镜进行 3D 形 貌合成后将数据导入 Origin 软件并生成其表面三维 形貌拟合图,如图 16 所示,观察图 16(d)、(e)、(f)可 发现,经激光清洗后的表面最大起伏高度均小于初始材料的表面最大起伏高度,对比图 16(a)、(b)、(c)可以发现,激光除锈后的 20 钢表面起伏稍缓,而激光除油污后的 20 钢表面较打磨处理后的表面起伏稍大。

综上所述,激光清洗后的表面对比 80 目砂纸打磨处理后的表面,其耐腐蚀性能变化较小,其中,激光除锈后的表面耐腐蚀性能因表面粗糙度的减小而稍有提高,而激光除油污后的表面耐腐蚀性能因表面粗糙度的增大而稍有下降。

### 3 结 论

本文利用激光清洗技术对石化设备普遍使用的 20 钢表面锈层以及油污进行了激光清洗试验,研究 了纳秒脉冲激光对清洗表面的影响,对激光除锈和 激光除油污后的试样表面的表面形貌、表面显微硬 度以及电化学腐蚀性能进行了分析,并对激光除锈 和除油污的物理机制进行了讨论,得到的结论如下:

- 1)激光作用于锈层或油污层等污染物层表面,会使其因吸收激光能量从而温度升高,当温度达到锈层或油污层的气化温度时,锈层或油污层会发生气化从而脱离基材表面。在此过程中,与锈层或油污层结合的基材表面也会吸收部分激光能量从而升高温度,当温度达到基材的熔化温度时,基材表面会发生熔化,在激光行进的路径留下痕迹,及发生基材的熔化烧蚀,基材表面的熔化烧蚀形貌可以反应出激光的光斑搭接率。
- 2) 初始材料为经 80 目砂纸打磨处理后的 20 钢,其表面显微维氏硬度分布较为规律,经纳秒脉冲激光清洗后的 20 钢表面显微维氏硬度虽分布较为杂乱,但硬度均高于初始材料,可见纳秒脉冲激光清洗 20 钢会提高其表面的显微硬度。在对材料进行电化学测试、分析表面的耐腐蚀性后发现,激光清洗在提高 20 钢表面显微硬度的同时,其表面的耐腐蚀性能不会受到明显影响。总而言之,激光清洗不仅具有良好的除锈和除油污效果,还可以提高材料表面的力学性能,为防止 20 钢再次氧化和表面强化提供了试验依据。

#### 参考文献:

[1] LI H Y, YANG F, GUO J W, et al. Development status and

prospect of laser cleaning[J]. Laser Technology, 2021, 45 (5):654-661.

李浩宇,杨峰,郭嘉伟,等.激光清洗的发展现状与前景[J].激光技术,2021,45(5):654-661.

- [2] XU X,FANG C H,LI J,et al. Analysis of ablation characteristics of foreign bodies in power transmission lie as by laser[J]. Journal of Optpelectronics Laser, 2021, 32 (6):637-644.
  - 徐鑫,方春华,李景,等.激光清除输电线路异物时异物 烧蚀特性分析[J]. 光电子・激光,2021,32(6): 637-644.
- [3] MAFFINI A, UCCELLO A, DELLASEGA D, et al. Laser cleaning of diagnostic mirrors from tungsten-oxygen tokamak-like contaminants[J]. Nuclear Fusion, 2016, 56(8): 086008.
- [4] LU Y, DING Y, WANG M L, et al. An environmentally friendly laser cleaning method to remove oceanic microbiofoulings from AH36 steel substrate and corrosion protection [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 314: 127961.
- [5] LI G,GAO W Y,ZHANG L,et al. The quality improvement of laser rubber removal for laminated metal valves[J].

  Optics and Laser Technology, 2021, 139:106785.
- [6] CHEN Y K. Study on laser cleaning technology of engine oil circuit parts[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

  陈翊坤. 发动机油路零件激光清洗的工艺研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.
- [7] DUAN C H, CHEN X K, LUO X P. Application prospect of laser cleaning in petrochemical field [J]. Photoelectric Engineering, 2020, 47(11):3-15. 
  段成红,陈晓奎,罗翔鹏.激光清洗在石化领域的应用前景浅析[J]. 光电工程, 2020, 47(11): 3-15.
- [8] WUYH,RENXC,LIUHX,et al. Effect of laser parameters on surface cleaning quality of carbon steel[J]. Laser Technology,2021,45(4):500-506. 吴勇华,任晓晨,刘皓贤,等. 激光参量对碳钢表面清洗质量的影响[J]. 激光技术,2021,45(6):500-506.
- [9] LIXF, DINGYS, WANGYC, et al. Common corrosion problems and anti-corrosion measures of petrochemical equipment[J]. Cleaning World, 2021, 37(11):59-60. 李小仿, 丁永生, 王永春, 等. 石油化工设备常见腐蚀问题及防腐蚀措施[J]. 清洗世界, 2021, 37(11):59-60.
- [10] DUAN C H, CHI H L, CHEN X K, et al. Application re-

search on laser cleaning of petrochemical equipment[J]. Applied Laser, 2021, 41(4): 826-832.

段成红,池瀚林,陈晓奎,等.石化设备激光清洗应用研究[J].应用激光,2021,41(4):826-832.

[11] LIXY, LICY, WANG D, et al. Effect of laser scanning speed on cleaning quality of rust 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

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.

- [12] GUO Z H. Numerical simulation and experimental study of nanosecond pulse laser paint removal [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
  - 郭召恒. 纳秒脉冲激光除漆的数值模拟与实验研究 [D]. 镇江:江苏大学,2020.
- [13] WANG K J. Study on pulse laser derusting process of Q235 carbon steel [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.

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.

[14] YU H B, WANG C M, WANG J, et al. Study on laser derusting of carbon steel surface[J]. Applied Laser, 2014,

34(4):310-314.

俞鸿斌,王春明,王军,等.碳钢表面激光除锈研究[J]. 应用激光,2014,34(4):310-314.

- [15] ZHANG R N, WEI P Y, GUO X, et al. Optimization of laser cleaning parameters and evaluation of surface properties of EH36 steel [J/OL]. Infrared and Laser Engineering, 1-9.(2022-04-11) [2022-05-20]. http://kns.cnki.net/kc-ms/detail/12.1261.TN.20220409.1621.004.html. 张若楠, 韦朋余,郭鑫,等.EH36 钢激光清洗参数优化与表面性能评估[J/OL]. 红外与激光工程,1-9.(2022-04-11) [2022-05-20]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20220409.1621.004.html.
- [16] EVGENY B, HUGHES T, ESKIN D. Effect of surface roughness on corrosion behaviour of low carbon steel in inhibited 4Mhydrochloric acid under laminar and turbulent flow conditions[J]. Corrosion Science, 2016, 103:196-205.

#### 作者简介:

**王** 涛 (1963一),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事光机电设备 一体化技术方面的研究.