

## EH36 钢激光清洗参数优化与表面性能评估

张若楠, 韦朋余\*, 郭鑫, 陈小平, 黄旭峰, 王连, 王若焯

(中国船舶科学研究中心, 江苏无锡 214082)

**摘要:** 针对船舶舱内复杂空间材料表面除锈需求, 利用脉冲光纤激光清洗平台开展了 EH36 船用钢板激光清洗工艺参数优化与清洗后材料表面性能实验研究。通过宏观、微观形貌观测与表面化学成分分析, 并结合船舶行业除锈标准规范, 建立了船用钢激光除锈质量评价准则, 以此确定了材料激光除锈最佳工艺参数。在此基础上开展激光除锈后材料表面质量、显微硬度、粗糙度及综合力学性能测试评估。研究表明: 在最佳除锈工艺参数 (平均功率 210 W、重复频率 250 kHz、脉冲宽度 300 ns、扫描速度 4000 mm/s) 下, 船用钢板表面质量达到 Sa2.5 等级, 力学性能基本保持不变, 能够满足船舶舱内复杂空间材料表面除锈工艺要求, 在船舶修造材料表面除锈领域具有优良的适用性。

**关键词:** 激光除锈; 船舶建造; 工艺参数; 性能评估; 表面质量

中图分类号: U66 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220155

## Optimization of laser cleaning parameters and evaluation of surface properties of EH36 steel

Zhang Ruonan, Wei Pengyu\*, Guo Xin, Chen Xiaoping, Huang Xufeng, Wang Lian, Wang Ruoye

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of removing rust on the surface of complex space materials in ship cabins, this paper adopts the pulsed fiber laser cleaning platform to carry out the optimization of laser cleaning process parameters and the experimental study on the surface properties of EH36 Marine steel plate after cleaning. Based on the macroscopic and microscopic morphology observation and surface chemical composition analysis, and combined with the derusting standard specification of the shipbuilding industry, the quality evaluation criterion of Marine steel laser rust removal is established, and the optimal process parameters of material laser rust removal are determined. On this basis, the surface quality, microhardness, roughness and comprehensive mechanical properties of the materials after laser derusting are tested and evaluated. The results show that, under the optimal derusting process parameters (average power 210 W, repetition frequency 250 kHz, pulse width 300 ns, scanning speed 4000 mm/s), the surface quality of Marine steel plate can reach Sa2.5 grade, and the mechanical properties remain basically unchanged, which can meet the requirements of derusting process on the surface of complex space materials in ship hold. It has excellent applicability in the field of surface rust removal of shipbuilding materials.

**Key words:** laser derusting; shipbuilding; process parameters; performance evaluation; surface quality

收稿日期: 2022-03-09; 修订日期: 2022-04-06

基金项目: 无锡市产业前瞻与关键技术 (工业) 项目 (锡科规 [2020]218 号)

作者简介: 张若楠, 男, 工程师, 硕士, 主要从事船舶工艺力学、激光加工及检测技术、船舶结构试验测试技术方面的研究。

通讯作者: 韦朋余, 男, 研究员, 硕士, 主要从事船舶结构力学和试验测试技术方面的研究。

## 0 引言

船舶涂装作业作为船体腐蚀防护的重要手段之一,直接影响海洋腐蚀环境下船舶整体服役寿命。船用钢表面二次除锈是涂装前的预处理工序,必须满足涂装前钢材表面清洁度要求。船舶密闭舱室内部由于各种结构部件与管件设备交错布置,除锈作业难度大,在绿色造船发展趋势下,激光除锈技术凭借环保、高效、无损、精确等综合优势而引起行业关注,并尝试应用到实际生产中。

沈全等<sup>[1]</sup>在 B 级锈蚀程度 Q235 钢除锈工艺实验中发现,相同扫描次数下,试件表面粗糙度与激光功率成正比,超出最佳除锈阈值后,材料出现凹坑、熔凝层等表面损伤。Zhang 等<sup>[2]</sup>发现在 1 kHz 与 2 kHz 重复频率条件下,低重复频率作用的材料表面凹坑较浅,所受冲击更加均匀而粗糙度较低。周建忠、俞鸿斌等<sup>[3-5]</sup>发现扫描速度较低造成基材表面残留少量锈斑,碳 (C)、氧 (O) 含量较高。扫描次数同样会对除锈质量与效率造成影响,同时,激光除锈扫描次数对于除锈效果具有一定的饱和性。李华婷等<sup>[6]</sup>研究发现,搭接率达到 60% 时,由于热累积造成的表面损伤,导致粗糙度增大,通过电化学腐蚀实验测试发现腐蚀电流密度急剧增大,耐腐蚀性降低。综上所述,目前研究主要集中在激光除锈参数与除锈效果之间的关联性方面,针对特定船用钢板激光除锈工艺研究与表面性能评估较少<sup>[7-11]</sup>,特别在激光工艺参数合理配置条件下,激光除锈技术能否满足船舶涂装前表面除锈质量要求仍然是一个亟待解决的问题。文中针对船舶舱内复杂空间结构材料表面除锈工艺要求,选用光纤激光除锈作业平台开展激光除锈工艺实验研究,系统分析了激光工艺参数与除锈效果之间的耦合关系,并确定除锈作业最优工艺参数,通过开展一系列力学、显微硬度与粗糙度测试,并结合船舶行业标准对清洗后表面质量进行考核,最终与传统机械打磨工艺和原始试样进行对比,对激光除锈技术在船舶修造领域的技术适应性进行综合评估,为后续船舶激光除锈技术研究与应用提供依据。

## 1 激光除锈实验

### 1.1 试样制备及实验装置

选取厚度为 10 mm 的 EH36 锈蚀船用钢板作为

实验材料,如图 1(a) 所示,根据 GB 8923—2011<sup>[7]</sup> 的标准,试样除锈前锈蚀等级为 B 级。使用线切割机将锈蚀试样切为 10 mm×10 mm×10 mm 的大小,为减小实验误差,需用装有无水乙醇的烧杯放置在超声波设备中清洗 2~4 min,随后用清水清洗烘干,去除表面污渍。侧面抛光后在高倍镜显微镜下观察,通过 CSMI 测量软件测量,测量锈蚀的厚度约为 25 μm,如图 1(b) 所示。

激光除锈实验平台如图 2 所示,由波长为 1064 nm 的脉冲光纤激光器、光束调整系统、自动升降工作

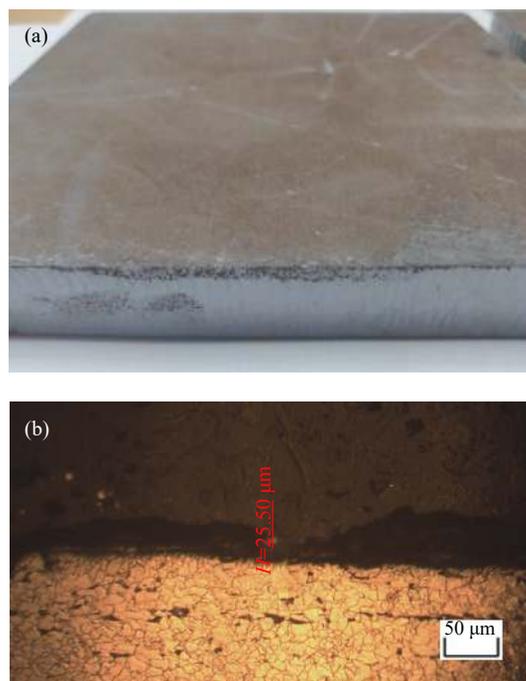


图 1 (a) 锈蚀试样; (b) 试样锈层厚度

Fig.1 (a) Corrosion sample; (b) Micro diagram of sample corrosion thickness

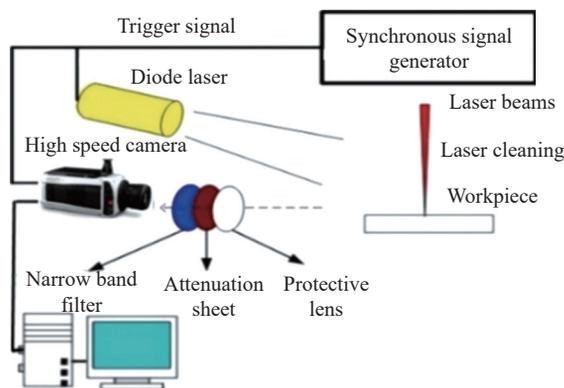


图 2 激光除锈实验平台示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser derusting experimental platform

台、电气控制柜及传输系统构成。其中,激光器的最大平均功率为 350 W,光束经过光束调整系统后直径为 0.05 mm,可实现自动化定量清洗。清洗过程中,激光器发射出脉冲激光,经过光纤传输系统进入激光清洗枪,光束调整系统将激光变为平行光,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,沿 Y 方向运动进行清洗作业。

### 1.2 实验方案设计

根据前期针对同种 EH36 锈蚀船板单因素实验的结果分析发现,激光平均功率对除锈效果影响最为显著,同时在激光平均功率探究实验中发现,如图 3 所示,激光平均功率百分比为 30% 时,试件表面呈现暗灰色,表明基材表面残留大量氧化物未去除;激光平

均功率百分比为 90% 时,基材表面为暗黄色,同时出现明显的基材表面烧蚀和二次氧化的过度清洗现象。因此,在实验方案制定中选取激光平均功率百分比、重复频率、脉冲宽度、电机频率和清洗速度等工艺参数,如表 1 所示。

表 1 激光除锈实验方案

Tab.1 Experimental scheme of laser derusting

Parameter type	Value				
Percentage of average laser power	40%	50%	60%	70%	80%
Repetition frequency/kHz	250				
Pulse width/ns	300				
Focal length of field mirror/mm	250				
Motor frequency/kHz	180				
Cleaning speed/mm·s <sup>-1</sup>	4000				

激光除锈后采用电子显微镜进行微观形貌观察,利用 X 射线能谱仪 (EDS) 测定清洗前后材料表面的元素含量分析,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,采用显微硬度仪进行显微硬度测试,并开展拉伸实验进行力学性能测试。通过与传统机械打磨工艺与原始试样力学性能、显微硬度、粗糙度进行对比,结合 GB8923《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》对其表面性能进行评估。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 材料表面形貌

#### 2.1.1 宏观形貌

不同平均功率百分比激光除锈作用后的基材表面宏观形貌与原始试件形貌如图 4 所示。能够明显发现:原始试件表面状态表面浮锈为红褐色,激光除锈后基材外层蓬松浮锈基本去除,由于激光烧蚀作用,基材表面留下明显的凹坑状表面形貌。激光功率百分比为 40% 时,表面呈现明显的灰褐色,基材表面致密的灰黑色氧化物未被完全去除,未达到最佳的除锈效果。在 50% 激光平均功率激光作用下,材料表面残余的锈蚀层被进一步去除,开始呈现 EH36 原有的金属色泽。

随着激光功率百分比提升至 60%,试件表面银色金属色泽面积进一步增加,激光除锈区域的银白色金

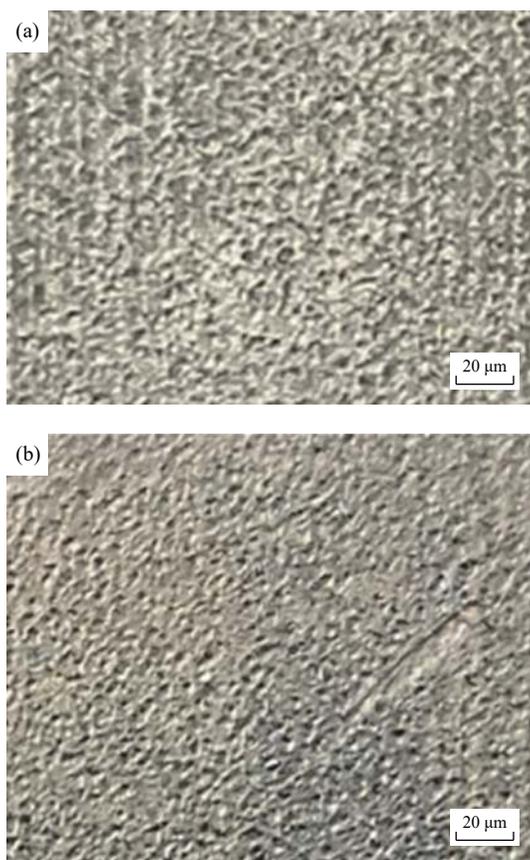


图 3 (a) 30% 功率百分比的激光作用后的基材表面宏观形貌; (b) 90% 功率百分比的激光作用后的基材表面宏观形貌

Fig.3 (a) Macroscopic morphology of the substrate surface after laser irradiation with 30% average power percentage; (b) Macroscopic morphology of the substrate surface after laser irradiation with 90% average power percentage

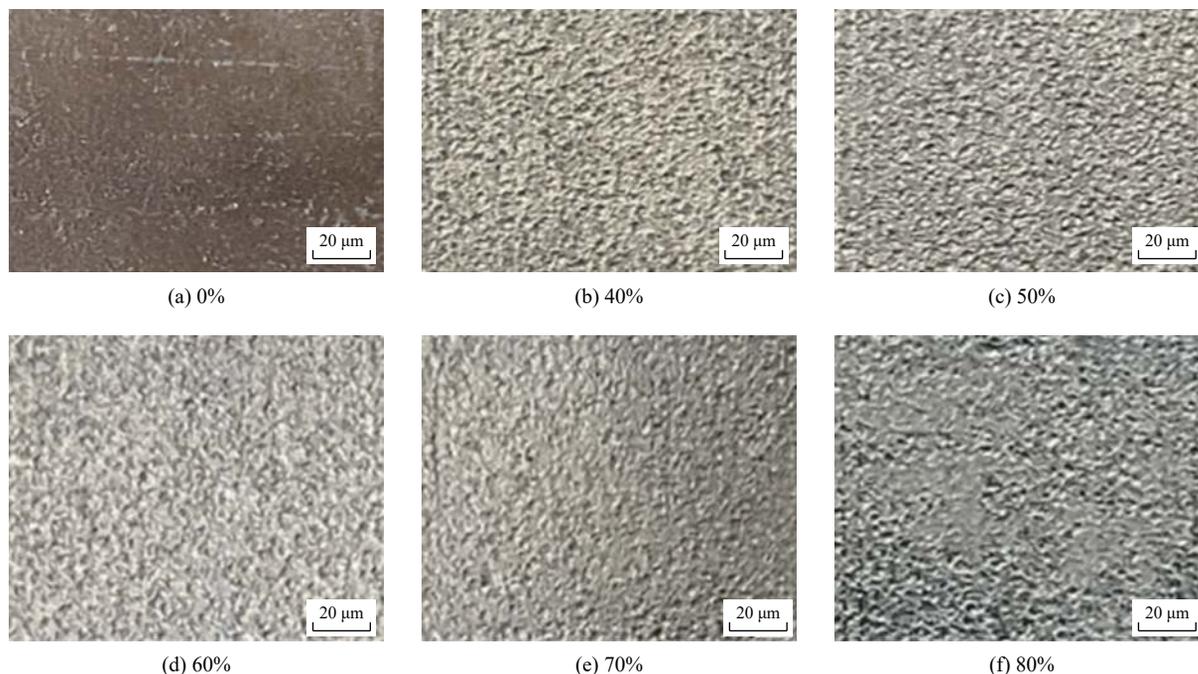


图 4 不同平均功率百分比的激光除锈作用后基材表面宏观形貌

Fig.4 Macroscopic morphology of substrate surface after laser derusting with different average power percentages

属基体颜色面积达到最大,表面黑灰色氧化物一定程度被完全去除,宏观视觉判定基本无铁锈、氧化皮等杂质,因此可以判断:在激光功率百分比为 60% 的条件下,锈蚀去除程度(锈蚀去除干净的面积占激光作用面积的比值)达到最优值。随着激光功率百分比进一步增加到 70% 和 80%,与最佳除锈效果的基材表面形貌相比,表面呈现淡黄色,并最终变为暗黄色,视觉观察下基材表面部分区域的凹坑出现熔融现象<sup>[10]</sup>。这是由于激光能量密度过高,基材表面过多热量积聚而产生部分区域二次氧化和熔融现象并发生了二次氧化。

肉眼观察是最直接判断锈蚀去除程度的方法,针对试样表面宏观形貌分析<sup>[11-12]</sup>,以激光除锈度高、表面颜色接近 EH36 船板金属基体本色为除锈质量评定准则,可以初步判断:激光功率百分比为 60% 的工况下激光除锈效果最佳。

### 2.1.2 微观形貌

如图 5 所示,在 100 倍显微镜下,试件表面原始状态为红褐色的  $Fe_2O_3$ ,由于涂装前船板表面锈蚀分布不均,部分区域露出黑灰色部分为  $Fe_3O_4$ 。激光除锈后,相较于试件原始形貌,基材外层蓬松的氧化物被完全去除,除锈效果明显,部分区域呈现银白色金

属本色,区域交界处仍为黑灰色氧化物,并没有被完全去除,这是由于激光光束形状呈高斯分布,边缘能量并不足以使样品表面发生质量迁移。激光功率百分比为 40% 时,表面可以明显看到大量密布的黑灰色暗斑,少部分区域可以看到露出银白色金属光泽,未达到最佳的除锈效果。在 50% 激光平均功率激光作用下,基材表面黑灰色暗斑区域减少,除锈效果有一定的提升。随着激光功率百分比进一步提升至 60%,激光除锈区域的银白色金属基体颜色面积达到最大,表面黑灰色氧化物大部分被去除,微观层面基体表面残留少量黑色铁锈与浅黄色氧化皮等杂质,通过对比可以判断:激光功率百分比为 60% 的条件下锈蚀去除程度(锈蚀去除干净的面积占激光作用面积的比值)达到最优值。

在激光功率百分比为 70% 和 80% 的条件下,与最佳除锈效果的基材表面形貌相比,表面颜色变暗,灰色区域面积显著增加,同时在视野范围内观察到蓝色铁的氧化物,这是由于激光功率的进一步提升,能量密度过高,导致材料部分区域出现二次氧化。

对于试样表面微观形貌分析,该项目以激光除锈度高、表面颜色接近 EH36 船板金属基体本色、基材

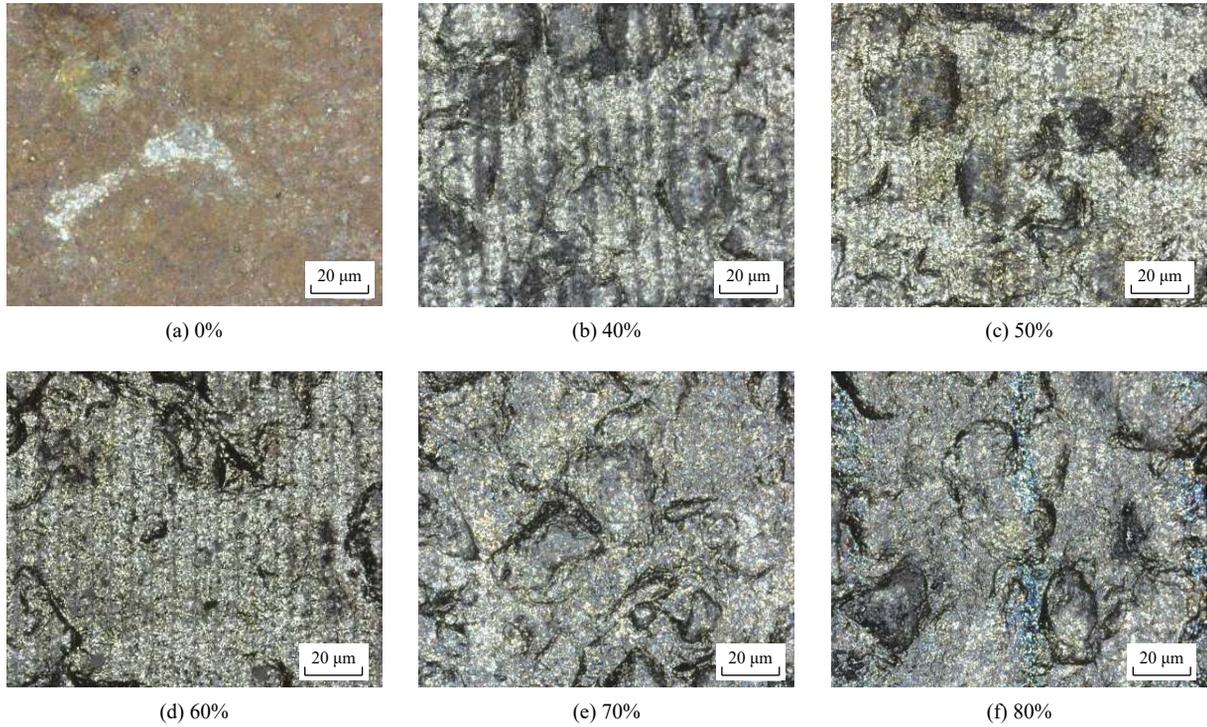


图 5 不同平均功率百分比的激光除锈作用后基材表面微观形貌

Fig.5 Micromorphology of substrate surface after laser derusting with different average power percentages

表面不发生明显的二次氧化现象为除锈质量评定准则,可以初步判断:激光功率百分比为 60% 的工况下激光除锈效果最佳。

### 2.2 材料表面化学成分分析

为了更准确地选定激光除锈最佳工艺参数,判断

锈蚀是否完全去除,可以对基材表面的化学成分进行检测,采用成份分析法分析清洗前后基材表面 Fe 元素和 O 元素的含量改变,确定最优清洗效果<sup>[13]</sup>。通过电子探针显微分析仪进行 EDS 面扫分析,结果如图 6 所示。

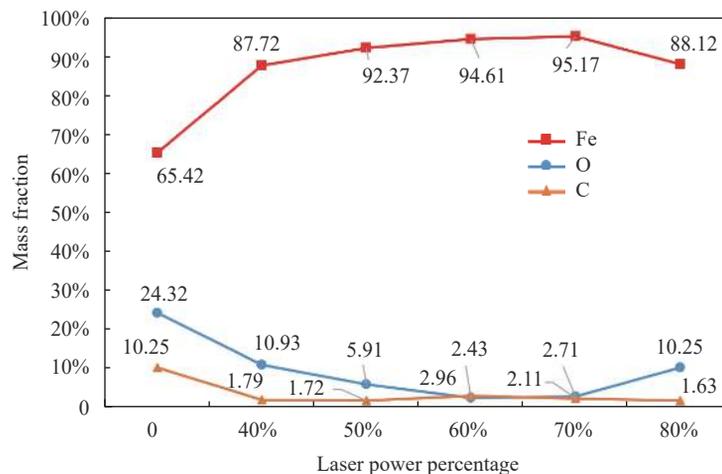


图 6 不同平均功率百分比的激光除锈作用后基材表面元素变化

Fig.6 Changes of surface elements after laser derusting with different average power percentages

通过对比不同功率百分比激光作用下 O 元素与 Fe 元素的变化趋势可以发现:当能量密度较低

(40%~50%) 时, O 元素含量较高,均在 5% 以上, Fe 元素含量低于 90%。随着激光功率逐步增加至 60%-

70% 的过程中,清洗后残余锈蚀层中 Fe 元素含量显著增加,达 95% 以上,O 元素含量明显减少,最低至 2.5% 左右,C 元素含量微量变化。表明锈蚀层烧蚀过程中发生了脱氧反应,C 元素并未发生氧化反应生成氧化物而被分离,基材吸收激光能量后表面温度升高,暴露在空气中不可避免地产生表层氧化膜,发生热加工氧化,因此在一定程度上可以认为此时锈蚀基本清除干净<sup>[14]</sup>。

随着激光能量密度的进一步增长,Fe 元素含量减少,O 元素含量增加,C 元素微量减小,基本保持不变,这说明由于能量密度提升,基材短时间内热输入过大,发生了氧化反应,C 以氧化物的形式被从表面

分离,除锈效果降低。由于锈蚀完成去除后,基材表面再次发生氧化不可避免,因此将激光除锈后基材表面氧含量最低的工况确定为最佳除锈工况。由此可以判断:在激光功率百分比为 60%~70% 的工况下激光除锈效果最佳<sup>[15]</sup>。

综上所述,参考试件表面宏观、微观形貌和元素含量分析结果,以激光除锈度高、表面颜色接近 EH36 船板金属基体本色、基材表面氧含量较低、不发生明显二次氧化为最佳激光除锈评定准则,可以判断:激光功率百分比为 60% 的工况下激光除锈效果最佳。因此,对于 B 类锈蚀程度的 EH36 船用钢板,最佳激光除锈工艺参数如表 2 所示。

表 2 激光除锈最佳工艺参数

Tab.2 Optimum process parameters of laser derusting

Parameter type	Percentage of average laser power	Repetition frequency/kHz	Pulse width/ns	Focal length of field mirror/mm	Motor frequency/kHz	Cleaning speed/mm·s <sup>-1</sup>
Value	60%	250	300	250	180	4000

### 2.3 材料表面清洗质量分析

根据 GB/T8923.1-2011《涂覆涂料前钢材表面处理表面清洁度的目视评定第一部分》,在传统喷射除锈作业后,钢材表面质量应达到 Sa2.5 标准。如图 7

所示,EH36 在最佳激光工艺参数作用下,表面的锈蚀去除非常彻底,无锈层残留,无不牢固粘接物,显示明显的银色金属光泽,达到 Sa2.5 的标准。

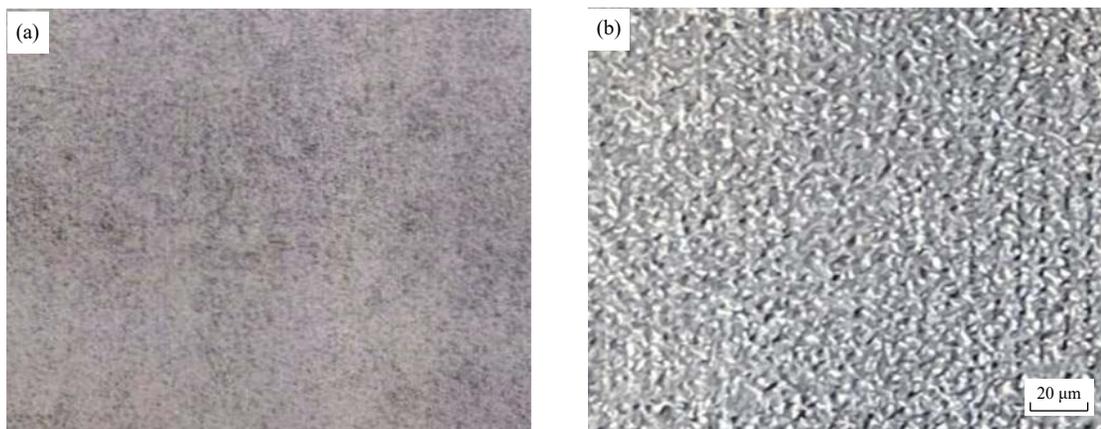


图 7 表面清洗质量对比。(a) GB/T 8923.1—2011 Sa2.5 表面清洁度;(b) 激光除锈后材料表面质量

Fig.7 Comparison of surface cleaning quality. (a) GB/T 8923.1—2011 Sa2.5 surface cleanliness; (b) Surface quality of materials after laser derusting

### 3 激光除锈后机械性能测试

为了研究激光除锈对除锈试样清洗层附近与基材的性能区别以及组织对性能的影响,探究不同除锈工艺下基材的力学性能与抗腐蚀性能的变化,采用最佳激光工艺参数对相同锈蚀程度的 EH36 船板进行除

锈处理,随后对激光除锈前后与机械打磨试样开展表面粗糙度与三维形貌、显微硬度与力学性能测试。

#### 3.1 表面粗糙度及三维形貌

采用激光共聚焦显微镜观测除锈表面的三维形貌并测量其表面粗糙度,如图 8 所示,可以发现,机械

打磨由于人工操作的不确定性,对基材表面损伤较为严重,处理后材料表面粗糙度分布不均,整体粗糙度明显大于原始试样与激光除锈后的材料。从图 8(a)与图 8(c)可以看出,激光除锈过后,深红色区域 (60  $\mu\text{m}$ )

面积明显变小,大部分锈蚀被去除干净,但由于脉冲激光在锈蚀表面的热效应整体较为均匀,与原始表面浮锈与致密氧化层相比,粗糙度没有显著增加。

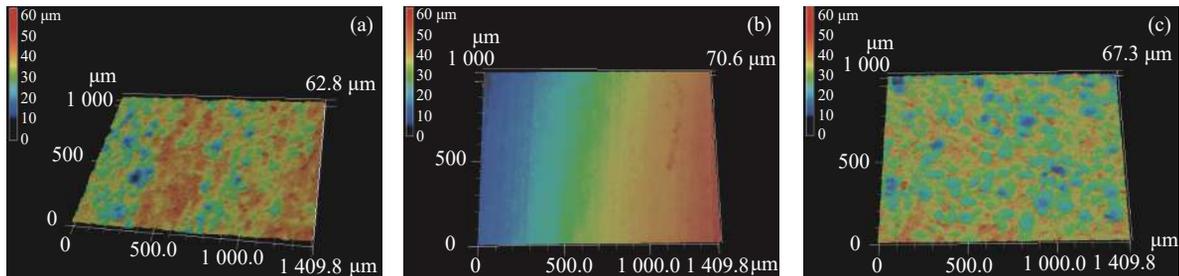


图 8 基材表面不同除锈方式的三维形貌与表面粗糙度。(a) 清洗前试样 (5.18  $\mu\text{m}$ ); (b) 机械打磨试样 (16.78  $\mu\text{m}$ ); (c) 激光除锈试样 (5.5  $\mu\text{m}$ )  
Fig.8 3-D morphology and surface roughness of substrate surface with different rust removal methods. (a) Pre-cleaning sample (5.18  $\mu\text{m}$ ); (b) Mechanical grinding sample (16.78  $\mu\text{m}$ ); (c) Laser derusting sample (5.5  $\mu\text{m}$ )

### 3.2 截面显微硬度

考虑到试样线切割加工会产生加工硬化导致边缘硬度提升,因此选定测试区域包括除锈层附近与基

材中心。为了保证测试精度,每层区域从左至右测试点选取间距均为 0.5 mm。图 9 为典型激光除锈与机械打磨试样的界面显微硬度测试结果。

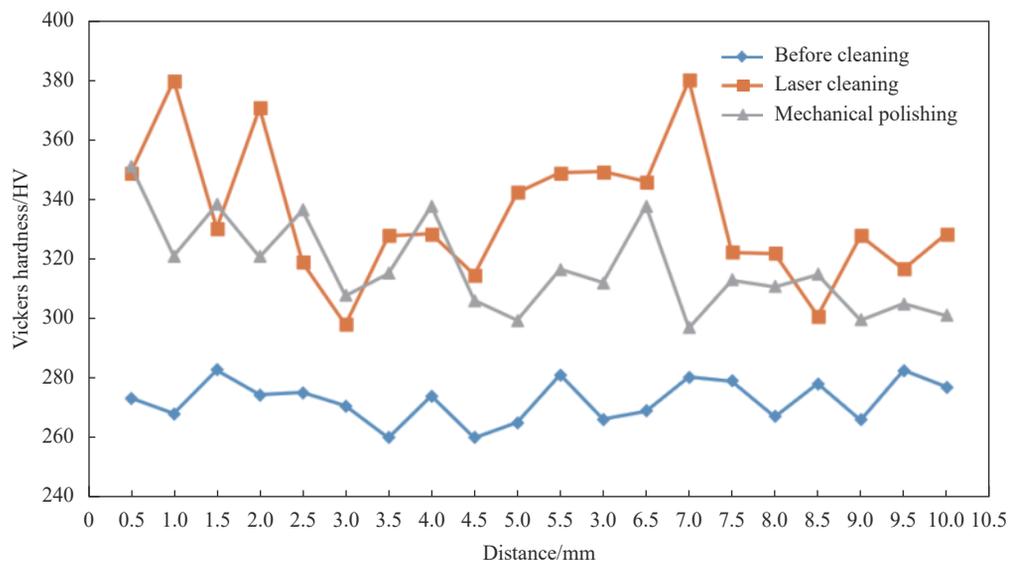


图 9 硬度测试结果对比

Fig.9 Comparison of hardness test results

由测试结果可知,激光除锈处理后,表面清洗层附近区域的硬度范围为 297~379 HV,平均硬度约为 335 HV;基材中心的硬度范围为 260~282 HV,平均硬度为 272 HV;机械打磨层附近区域硬度范围为 297~351 HV,平均硬度为 323 HV。可以看出:激光作用使表面清洗层附近的硬度较母材提高了 23.2%,与传统

机械打磨工艺相比,硬度值提升不明显,仅为 0.4%。结合前期除锈截面组织观测结果,参考图 10 所示 60% 和 70% 功率百分比下的激光除锈界面的组织形貌可以发现,清洗层的晶粒组织与靠近基材中心处相比出现明显的晶粒细化,显微硬度显著增强,因此可以推断:与原始基材相比,激光除锈能够显著改善基

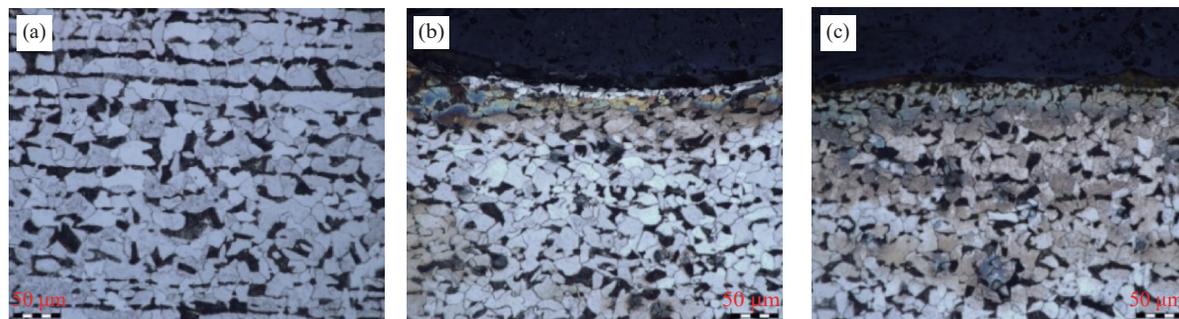


图 10 典型激光除锈试样清洗层附近截面微观组织。(a) 基材中心; (b) 60% 功率百分比清洗层附近区域; (c) 70% 功率百分比清洗层附近区域  
Fig.10 Sectional microstructure near the cleaning layer of typical laser derusting sample. (a) Substrate center; (b) Cleaning area near the layer with 60% laser power percentage; (c) Cleaning area near the layer with 70% laser power percentage

材清洗层的显微硬度。

### 3.3 力学性能

由于脉冲激光在除锈的极短时间内产生很大的热效应,在局部区域可能影响材料的力学性能及后续的应用。将 B 类锈蚀程度的 EH36 船板通过线切割方法根据相关标准制备三组拉伸实验标准试样,采用功率百分比为 60% 的脉冲激光与机械打磨分别对试样进行除锈处理,然后通过万能实验机对每组 EH36 试样进行拉伸实验。三组试样拉伸实验所得的平均数据如表 3 所示。

表 3 激光除锈前后基材力学性能指标

Tab.3 Mechanical properties of substrate before and after laser derusting

Sample type	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$
The original sample	356	421	23.6%
Mechanical grinding sample	354	418	23.1%
Laser derusting sample	361	413	22.4%

通过对比相关实验数据可以看出:与原始基材相比,机械打磨后材料各项力学性能指标变化不大,这是由于打磨过程中产生的热量不足以使材料发生显著相变。通过激光除锈处理的试样在抗拉强度、断后伸长率等塑性指标上略有下降,屈服强度有所提升,考虑到引伸计与试件装夹带来的实验误差,可以认为激光除锈后基材的抗拉强度、屈服强度与断后伸长率基本保持不变。原因在于激光除锈过程中,尽管激光的峰值功率很高(可达到兆瓦级),但单脉冲持续时间很短(仅 200~300 ns),因此造成激光在基材上的热作用深度很浅,整体的力学性能改变较小。

综上所述,激光清洗后基材表面粗糙度没有明显提升,硬度显著增加,结合相关船板漆膜附着力与激光除锈后粗糙度、显微硬度关系的研究成果可知,该参数下激光除锈作业能够保证足够的漆膜附着力,为后续涂装工序产生有益影响。此外,激光除锈后基材的抗拉强度、屈服强度等力学性能参数基本保持不变,不会对基材的力学性能造成明显的不良影响。

## 4 结 论

基于 350 W 脉冲激光清洗平台开展了 EH36 船用钢激光除锈工艺实验研究。通过宏观、微观形貌观测与基材表面化学成分分析,确定了激光除锈最佳工艺参数,并对除锈后船用钢板进行了机械性能测试评估,得到结论如下:

(1) 以基材表面无锈层残留与牢固粘接物、颜色接近船用钢基体本色、表面氧含量较低、不产生明显二次氧化为最佳激光除锈效果评价准则。针对 B 类锈蚀程度 EH36 船板,确定激光除锈最佳工艺参数为:激光平均功率百分比 60%、激光重复频率 250 kHz、脉冲宽度 300 ns、场镜焦距 250 mm、电机频率 180 kHz、清洗速度 4000 mm/s。

(2) 激光除锈作业后,与原始基材相比,EH36 船用钢表面粗糙度没有明显提升,硬度显著增加,力学性能基本保持不变,表面性能指标不低于机械打磨作业。

(3) EH36 船用钢在激光除锈最佳工艺参数作用下,材料表面质量达到 GB/T 8923.1—2011 中 Sa2.5 标准,表面硬度与粗糙度可以保证足够漆膜附着力,能够满足船舶舱内复杂空间结构表面除锈工艺要求,

验证了激光清洗技术在船舶修造材料表面除锈领域的技术适用性与可行性。

#### 参考文献:

- [1] Shen Quan, Tong Yanqun, Ma Guidian. Study on surface roughness of the substrate after laser derusting [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(6): 605-608. (in Chinese)
- [2] Zhang J, Wang Y, Cheng P, et al. Effect of pulsing parameters on laser ablative cleaning of copper oxides [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(6): 2217.
- [3] Zhou Jianzhong, Li Huating, Sun Qi, et al. Laser derusting mechanism of AH32 steel based on cleaned surface topography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1754-1764. (in Chinese)
- [4] Yu Hongbin, Wang Chunming, Wang Jun, et al. Research on the laser de-rusting of carbon steel surface [J]. *Applied Laser*, 2014, 34(4): 310-314. (in Chinese)
- [5] Zhu Ming, Zhou Jianzhong, Meng Xiankai, et al. Optimization of laser cleaning process parameters for Q345C steel rust layer based on response surface [J]. *Surface Technology*, 2019, 48(11): 381-391. (in Chinese)
- [6] Li Huating, Zhou Jianzhong, Sun Qi, et al. Electrochemical corrosion properties of AH32 steel via laser cleaning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(21): 211403. (in Chinese)
- [7] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Preparation of steel substrates before application of paints and related products—Visual assessment of surface cleanliness—Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings: GB/T 8923.1—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [8] Tong Yanqun, Zhang Ang, Huang Jianyu, et al. Distribution and influence of oxygen content of laser pretreated aluminum alloy surface before welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0202003. (in Chinese)
- [9] Li Shuai, Li Ye, Li Pan, et al. Study on the varnish stripping experiment based on the high power fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S106008. (in Chinese)
- [10] Hsu S C, Lin J. Removal mechanisms of micro-scale particles by surface wave in laser cleaning [J]. *Optics & Laser Technology*, 2006, 38(7): 544-551.
- [11] Lee K C, Lin J. Transient deformation of thin metal sheets during pulsed laser forming [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(8): 639-648.
- [12] Xue Yafei, Wang Wei, Wang Xuefeng, et al. Laser cleaning technology of 38 CrMoAl material surface pollutants [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0706004. (in Chinese)
- [13] 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. (in Chinese)
- [14] Wang Zemin, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. Study on the mechanism and technology of laser cleaning tire mold surface rubber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(11): 1050-1054. (in Chinese)
- [15] 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.