

HT250 灰铸铁纳秒脉冲激光除漆工艺研究

郭召恒^{1**}, 周建忠^{1*}, 孟宪凯¹, 孙奇¹, 朱明¹, 杨嘉年¹, 付强²

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

²南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038

摘要 为揭示激光参数对纳秒脉冲激光除漆后表面形貌的影响规律,采用纳秒脉冲激光器对 HT250 铸铁表面水性防锈漆层进行激光清洗试验;研究了激光除漆后的表面形貌与氧含量的关系,以及激光除漆后表面的三维形貌、表面粗糙度;最后测量了残余漆层的面积,以此表征除漆率。结果发现:表面粗糙度随着激光功率的增大而增大,并随着除漆速度降低而呈现先减小后增大的趋势;随着脉冲频率的增大漆层发生焦化现象,清洗速度的减小使除漆机制由振动和烧蚀效应转变为以烧蚀效应为主,导致清洗率呈现先减小后增大的趋势;在本试验条件下,当激光功率为 50 W、脉冲频率为 90 kHz、除漆速度为 7000 mm/s 时,除漆效果最佳,除漆率为 99.4%。

关键词 激光技术; 激光除漆; 工艺参数; 表面形貌; 表面粗糙度; 除漆率

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1002012

Nanosecond-Pulsed-Laser Paint Stripping of HT250 Gray Cast Iron

Guo Zhaoheng^{1**}, Zhou Jianzhong^{1*}, Meng Xiankai¹, Sun Qi¹,
Zhu Ming¹, Yang Jianian¹, Fu Qiang²

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

²Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing, Jiangsu 210038, China

Abstract A nanosecond-pulsed-laser paint stripping experiment is performed to reveal the influences of laser parameters on the surface morphology of laser paint stripping. The surface morphology and oxygen content are observed; the three-dimensional morphology and surface roughness are evaluated; the residual-paint-layer area is measured to characterize the cleaning rate. The results show that the roughness of the paint-stripped surface increases with the increasing laser power. With a decrease in the cleaning speed, the roughness first decreases and subsequently increases. Coking occurs with an increase in the pulse frequency. The paint removal mechanism changes from the vibration and ablation effects to the ablation effect with a decrease in the cleaning speed; this results in a decrease followed by an increase in the cleaning rate. Under the experimental condition of 50 W laser power, 90 kHz pulse frequency, and 7000 mm/s cleaning speed, the best laser cleaning is achieved, and the paint stripping rate is 99.4%.

Key words laser technology; laser stripping; processing parameters; surface topography; surface roughness; paint stripping rate

OCIS codes 140.3390; 150.5495; 180.6900; 240.5770

1 引言

激光除漆技术是一项近年来快速发展的新型除漆技术,其利用激光与漆层/基底相互作用而产生的一系列物理化学反应来达到除漆目的^[1-2]。激光除

漆技术与传统的除漆技术相比有着无可比拟的优越性:无接触、定位准确、除漆效果佳、应用范围广、安全无污染等,已被广泛应用于航空航天、武器装备、金属模具和再制造等领域^[3-4]。

目前,国内外学者已在激光除漆技术的除漆机

收稿日期: 2019-05-14; 修回日期: 2019-06-11; 录用日期: 2019-06-13

基金项目: 江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)项目(BE2017001-2, BE2017001-1)、江苏大学校科研立项(17A178)、江苏大学工业中心大学生创新实践基金(ZXJG2018056)

* E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn; ** E-mail: 320321a0e0p.cdb@sina.cn

理、工艺规律方面开展了系列研究。在除漆机理方面:Watkins^[5]认为激光除漆过程中存在着以热烧蚀、热振动、选择性气化等为主的6种作用机理;Li等^[6]结合不同能量密度的激光除漆试验及数值模拟分析后认为,激光除漆过程中存在热烧蚀、热应力和电离机理,选择合适的激光能量密度可以通过热应力在不损伤基底的情况下将漆层去除;Autric等^[7]认为激光除漆机理与漆层对激光的吸收特性有关,相对于激光透明的介质容易实现振动去除,非透明介质中的热烧蚀为主要的去除机理;施曙东等^[8]对钢表面的漆层进行了激光去除,并通过模拟和分析除漆过程中的温度场得出激光除漆的主要机理为振动效应和烧蚀效应;Zou等^[9]建立了激光除漆的理论模型,通过计算除漆过程中的热应力和阈值分析认为热致应力是短脉冲激光除漆的主要机理;王德良等^[10]通过分析激光除漆过程中喷溅的颗粒形貌及成分后认为,在激光除漆过程中主要存在振动去除和热烧蚀去除两种机理。在工艺规律方面:Li等^[11]使用Nd:YAG脉冲激光对钢铁表面进行清洗,得到了不同除漆工艺参数下钢的表面粗糙度和再涂覆黏合强度,最终获得的最佳除漆表面粗糙度为 $2\ \mu\text{m}$,再涂覆黏合强度为 $20\ \text{MPa}$;Brygo等^[12]对纳秒脉冲Nd:YAG激光除漆过程进行了研究,分析了激光能量密度、脉冲频率以及脉宽等工艺参数对激光除漆效率的影响,最终获得的最佳除漆效率为 $0.3\ \text{mm}^3/\text{J}$ 。Schmidt等^[13]使用 $2.5\ \text{kW}$ 高功率二极管激光进行了激光除漆试验,研究得到了单脉冲去除厚度与激光能量密度,以及除漆速率与激光功率分别呈线性关系,并且得到了最优的除漆速率为 $250\ \text{mm}^3/\text{s}$ 。Jasim等^[14]使用纳秒脉冲光纤激光清洗了铝合金基底上 $20\ \mu\text{m}$ 厚的白色聚合物漆层,研究了搭接率、除漆次数和脉冲频率对加工深度的影响,并优化得到了最佳试验条件下油漆的去除速率为 $11.7\ \text{cm}^2/\text{min}$,去除效率为 $2.9\ \text{cm}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kW}^{-1}$ 。Shamsujjoha等^[15]对船用钢表面的漆层进行了激光去除,分析了除漆后的表面形貌、微观结构、硬度和附着力的变化,结果表明,激光除漆技术对船用钢表面粗糙度和硬度没有显著影响,但可以有效提高再涂覆的黏合强度。虽然目前对激光除漆工艺参数的研究有很多,但结合激光除漆机理以及激光与物质的相互作用对除漆过程和规律进行研究的报道还比较少,结合激光除漆规律对除漆表面质量进行控制仍是一个亟需解决的问题。

本文基于再制造工艺使用纳秒脉冲激光对铸铁表面的水性防锈漆进行去除试验,探讨了不同激光功率、脉冲频率和除漆速度下激光除漆后的表面形貌、成分及除漆率的变化规律,分析了除漆过程中温度场的变化及除漆机制,研究了工艺参数对除漆质量和除漆效率的影响,获得了最佳的工艺参数范围,为激光除漆工艺过程控制和表面质量优化提供了依据。

2 试验装置与方法

2.1 试样制备

试验所用基底材料为HT250灰铸铁,其主要成分与含量如表1所示。铸铁板被数控电火花线切割成 $40\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$ 的长方体试样块,然后使用 $320\# \sim 1500\#$ SiC砂纸逐级打磨,再用无水乙醇进行超声波清洗,然后使用吹风机吹干,在试样表面手工喷涂约 $100\ \mu\text{m}$ 厚的铁红色水性防锈漆。

表1 HT250灰铸铁的主要化学成分
Table 1 Main chemical constituents of HT250 gray cast iron

Element	C	Si	Mn	S	P	Fe
Mass fraction /%	3.2	1.79	0.78	0.12	0.08	Bal.

2.2 激光除漆试验

激光除漆系统如图1(a)所示,包括脉冲光纤激光器、扫描振镜、固定平台和控制系統。其中激光器采用IPG公司生产的YLP-HP-1-100-100-100型光纤激光器,激光器的具体参数如表2所示。采用“S”型除漆路径对 $5\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ 区域内的漆层进行去除,如图1(b)所示。

表2 激光器主要技术参数
Table 2 Main technical parameters of laser

Parameter	Content
Wavelength /nm	1064
Power /W	≤ 100
Pulse width /ns	100
Frequency /kHz	≤ 100
Scan speed /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	≤ 8000
Spot diameter /mm	0.05
Spot shape	Circle

激光除漆工艺参数可以影响除漆质量和除漆效率,其中影响较为显著的参数包括:除漆次数(T)、激光功率(P)、脉冲频率(f)和除漆速度(v)。为了达到高效除漆的目的,本研究均采用1次扫描除漆工艺。根据前期的预研试验结果,选择激光功率分别为 $40, 50, 60\ \text{W}$,脉冲频率为 $50\sim 100\ \text{kHz}$,除漆速度为 $3000\sim 8000\ \text{mm/s}$ 。

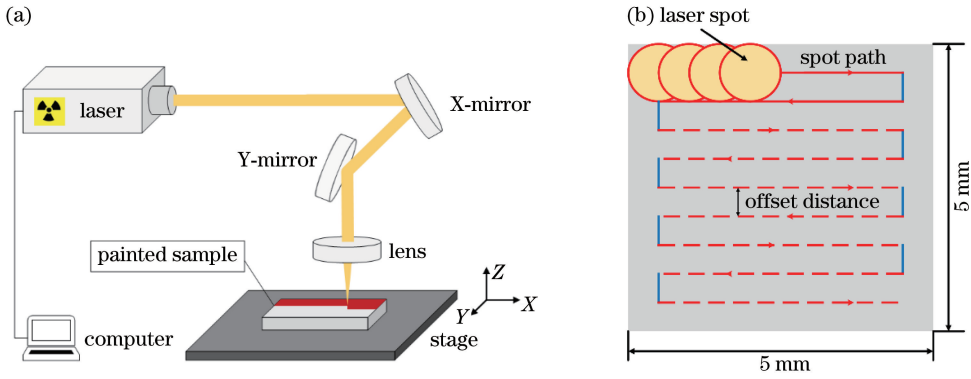


图 1 除漆设备和路径示意图。(a)激光除漆设备示意图;(b)激光除漆路径示意图

Fig. 1 Schematics of equipment and path of paint stripping. (a) Schematic of setup for laser paint stripping; (b) schematic of laser stripping path

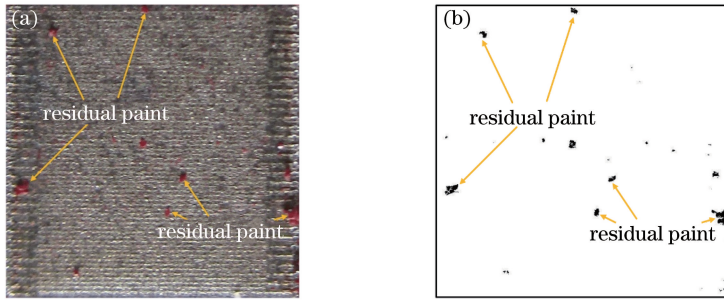


图 2 激光除漆区域及其二值化对比图。(a)激光除漆区域;(b)二值化的激光除漆区域

Fig. 2 Comparison of laser paint stripping area and binarization. (a) Laser paint stripping area; (b) binarized laser paint stripping area

激光除漆试验完成后,使用激光共聚焦显微镜观测除漆表面的三维形貌并测量表面粗糙度;采用日本日立(Hitachi)公司生产的 S-3400N 型扫描电子显微镜(SEM)分析除漆表面的微观形貌,采用电镜附带的 X 射线能谱仪(EDS)对除漆表面的元素含量进行检测。此外,利用 Canon IXUS 132 型数码相机对除漆表面进行拍照,利用图片编辑软件 Photoshop 对拍摄图片中的除漆区域进行截取,使用 MATLAB 软件对图像进行二值化,将残余漆层区域和除漆区域分别识别为黑色和白色,如图 2 (a)、(b)所示,将白色区域占总面积的比值作为除漆率。

3 结果与讨论

3.1 表面形貌

图 3 为不同激光功率下除漆后的表面形貌,可见:在相邻光斑未搭接时,清洗表面呈现出明显的凹坑痕迹,且凹坑内部十分光滑;随着激光功率增大,凹坑面积明显增大。从图 4 可以看出,除漆表面氧含量随着激光功率的增大而升高。

单脉冲激光作用一个脉宽时间产生的温升模型

可以表示为^[16-17]

$$\Delta T = \frac{2F\gamma}{\kappa} \sqrt{\frac{\alpha\tau}{\pi}}, \quad (1)$$

式中: ΔT 为温升 (K); F 为激光功率密度 (W/cm^2); γ 为材料的吸收率; κ 为材料的热导率 [$W/(m \cdot K)$]; α 为材料的热扩散率 (m^2/s), τ 为激光脉宽(s)。由(1)式结合漆层的热物性参数^[7]可知,40 W 激光功率下漆层的表面温升为

$$\Delta T = \frac{2 \times 2.04 \times 10^{10} \times 0.25}{0.3} \cdot \sqrt{\frac{9.19 \times 10^{-8} \times 10^{-7}}{\pi}} = 1839 \text{ K}. \quad (2)$$

(2)式显示,温升高达 1839 K,远超过漆层的气化温度,因此在一个脉宽时间内漆层就会产生气化。热传导作用使得热量经过漆层传递到基底,导致基底表面温度超过其熔点,因此可以看到基底表面因熔融而产生的凹坑。同时,基底熔化膨胀驱动熔池物质飞溅,在凹坑周围生成了诸多熔融飞溅物,如图 3 所示。随着激光功率增大,除漆表面热影响区面积增加,凹坑面积增大,基底发生显著的氧化反应,通过 EDS 检测发现除漆表面的氧含量持续增加,如图 4 所示。

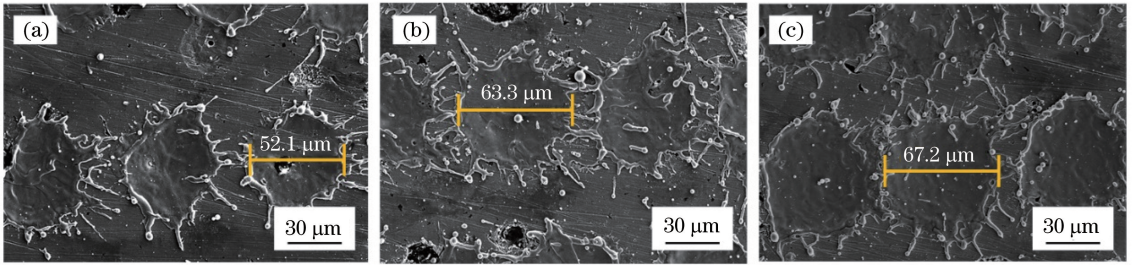


图 3 $v=8000$ mm/s 和 $f=80$ kHz 时,不同激光功率下除漆后的表面形貌。(a) $P=40$ W;(b) $P=50$ W;(c) $P=60$ W
Fig. 3 Surface morphologies after laser stripping at different laser powers with $v=8000$ mm/s and $f=80$ kHz.

(a) $P=40$ W; (b) $P=50$ W; (c) $P=60$ W

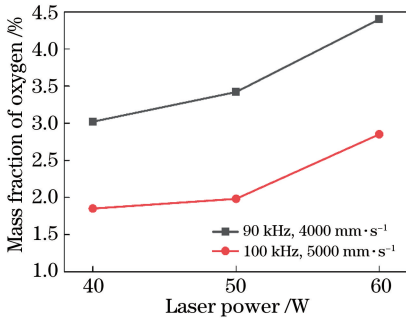
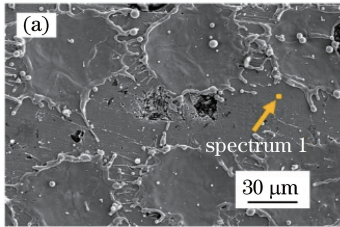


图 4 不同激光功率下除漆表面的氧含量

Fig. 4 Oxygen content after laser stripping at different laser powers

$v=8000$ mm/s 时激光除漆表面形貌及残余漆层成分如图 5 所示。从图 5(a)可以看出,在除漆速度为 8000 mm/s 时,除漆表面凹坑出现明显分离。未搭接区域除漆表面铁元素的质量分数为 90.35%,氧元素的质量分数仅为 0.99%,说明此处基底没有

发生氧化,如图 5(b)所示。另外,图 5(c)、(d)的结果表明,除漆表面存在不规则的颗粒状和丝状残余漆层。由于漆层与基底的热膨胀系数不同,两种材料的结合面处会出现温度梯度,进而产生热应力,在热应力作用下熔化的漆层被振动弹离基底,部分漆层再沉积到基底表面,形成了颗粒状或丝状的残余漆层^[18]。由于此时未搭接区域的漆层主要依靠热应力振动去除,因此基底不会发生熔融氧化现象,所以此处氧元素的质量分数(0.99%)极小。 $v=4000$ mm/s 时激光除漆表面形貌及能谱图如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,此时由于前后两个光斑之间的影响区相互搭接,基底熔融物堆积在表面,观察不到光斑痕迹及除漆轨迹。基底熔融物在高温下与空气中的氧结合,导致基底部分区域氧元素的质量分数达到 17.05%,如图 6(b)所示。熔融层的流动覆盖了激光除漆路径,在很高的温度下漆层被烧蚀



(b)

Element	Mass fraction / %	Atomic fraction / %
Fe	90.35	73.55
C	5.07	19.18
O	0.99	2.87
Others	3.59	4.40

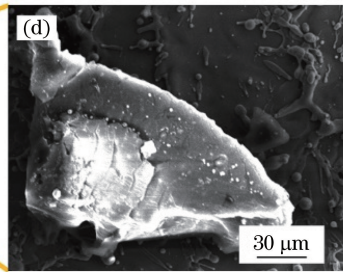
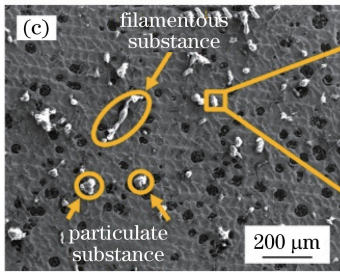
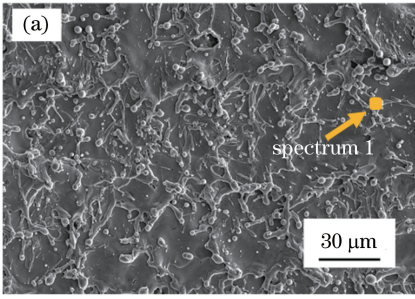


图 5 当 $f=80$ kHz, $P=50$ W, $v=8000$ mm/s 时,激光除漆表面及残余漆层的形貌,以及基底处的 EDS 分析结果。

(a) SEM 形貌;(b) EDS 分析结果(spectrum 1);(c)除漆表面的残余漆层形貌;(d)残余漆层的局部放大图

Fig. 5 Laser stripping surface and residual paint layer morphologies and EDS analysis results of base when $f=80$ kHz, $P=50$ W, and $v=8000$ mm/s. (a) SEM morphology; (b) EDS analysis results; (c) residual paint layer morphology of cleaning surface; (d) partial enlargement of residual paint layer



Element	Mass fraction /%	Atomic fraction /%
Fe	72.12	41.33
C	8.50	22.65
O	17.05	34.09
Others	2.33	1.93

图 6 当 $f=80\text{ kHz}$, $P=50\text{ W}$, $v=4000\text{ mm/s}$ 时, 激光除漆表面形貌及 EDS 分析结果。(a) SEM 形貌; (b) EDS 分析结果
Fig. 6 Laser stripping surface and EDS analysis results when $f=80\text{ kHz}$, $P=50\text{ W}$, and $v=4000\text{ mm/s}$.

(a) SEM morphology; (b) EDS analysis results

气化去除, 基底上观察不到残余漆层的存在。

3.2 表面粗糙度

对激光除漆处理后的试样进行表面粗糙度测试。为了保证测量结果的准确性, 每块样品测试三次后取平均值。不同激光功率下激光除漆后表面粗糙度的变化规律如图 7 所示。可以看出: 除漆后的表面粗糙度随激光功率的增大而增大; 在除漆速度为 7000 mm/s 的条件下, 当激光功率为 40 W 时, 除漆表面温升效应不显著, 脉冲激光在基底表面产生的凹坑深度较小, 表面粗糙度为 $3.44\text{ }\mu\text{m}$; 随着激光功率逐渐增大, 脉冲激光烧蚀产生的凹坑深度和直径增大, 表面粗糙度增大, 例如当激光功率达到 60 W 时表面粗糙度为 $3.76\text{ }\mu\text{m}$; 在除漆速度为 5000 mm/s 的条件下, 当激光功率为 40 W 时, 表面粗糙度为 $3.56\text{ }\mu\text{m}$, 此时相邻光斑出现搭接, 热积累效应增强, 基底熔化使凹坑间出现重合, 基体表面熔融物的堆积导致表面粗糙度相较于除漆速度为 7000 mm/s 时有所增加^[19-20]; 当激光功率增加到 60 W 时表面粗糙度为 $3.84\text{ }\mu\text{m}$, 此时基底材料吸收了大量的热, 形成了较深的熔融层, 导致熔融物进一步堆积, 使表面粗糙度进一步增加。

图 8 为激光除漆后表面粗糙度随除漆速度的变

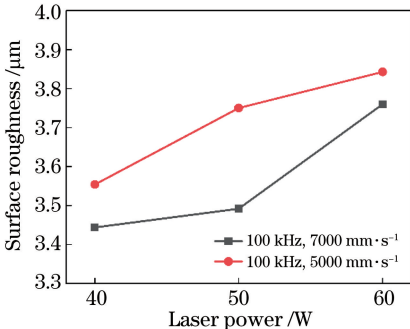


图 7 不同激光功率下除漆后的表面粗糙度
Fig. 7 Surface roughness for cleaning at different laser powers

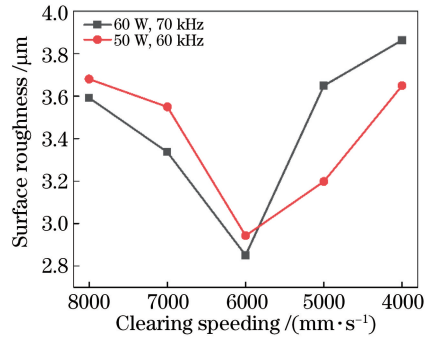


图 8 不同除漆速度下除漆后的表面粗糙度
Fig. 8 Surface roughness for cleaning at different cleaning speeds

化曲线, 可以看出, 随着除漆速度增大, 表面粗糙度呈现出先减小后增大的变化趋势。在激光除漆过程中, 当激光功率和脉冲频率一定时, 激光与材料表面的相互作用程度主要由除漆速度决定。在除漆速度从 6000 mm/s 变化到 8000 mm/s 的过程中, 表面粗糙度逐渐增大, 这是因为随着除漆速度的增大, 相邻光斑间距离增大, 应力振动导致沉积到基底表面的漆层颗粒增大, 从而导致表面粗糙度增加。当除漆速度降低到 6000 mm/s 时, 凹坑在熔融膨胀和激光冲击力的作用下被部分填平, 表面粗糙度降低。当除漆速度小于 6000 mm/s 时, 相邻光斑的搭接导致熔融物出现堆积, 表面粗糙度增大。

3.3 除漆率

图 9 所示为激光脉冲频率对除漆率的影响, 可以看出, 当激光功率和除漆速度一定时, 随着激光脉冲频率增大, 除漆率呈现先减小后增大的变化趋势。

随着激光脉冲频率增大, 相邻激光脉冲在更短的时间内依次辐照在漆层表面, 导致热量大量累积。漆层的热扩散率较低, 致使高分子化合物的水性防锈漆发生焦化而生成气化阈值很高的抗烧蚀层^[12,21], 阻挡了激光对深层材料的直接作用, 极大地降低了漆层的质量迁移。因此, 激光脉冲频率超

过一定值后,激光除漆率反而会降低。

激光除漆速度对除漆率的影响规律如图 10 所示,可以看出,随着除漆速度减小,激光除漆率呈现先减小后增大的趋势。当激光除漆速度较高时,相邻激光脉冲间距较大,光斑未覆盖处的漆层在热应力作用下被振动去除。随着除漆速度逐渐减小,漆层与基底间的温度梯度变小,产生的热应力和温度都不足以将漆层完全去除,所以除漆率降低。随着激光除漆速度继续减小,热积累效应明显,漆层表面温度急剧增高,此时热烧蚀机制占主导,因此激光除漆率又逐渐增大。

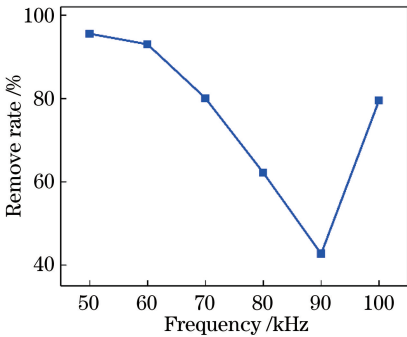


图 9 脉冲频率对除漆率的影响

Fig. 9 Effect of pulse frequency on remove rate

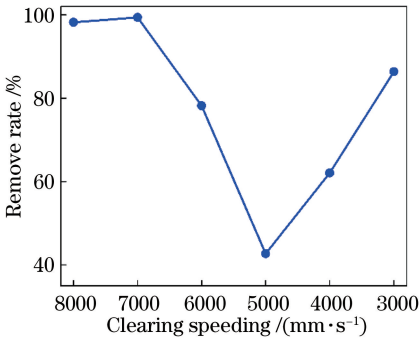


图 10 除漆速度对除漆率的影响

Fig. 10 Effect of cleaning speed on remove rate

另外,当激光除漆速度较高时,基底上总会存在残余漆层,因此除漆率不会达到 100%。但此时基底几乎不会被氧化,氧元素质量分数较低,整体表面质量优于低速除漆的表面质量。如图 10 所示,当激光功率为 50 W、脉冲频率为 90 kHz、除漆速度为 7000 mm/s 时,除漆率可达到 99.4%,除漆后的表面形貌和表面粗糙度相对较好,是本文试验条件下的最佳除漆参数。

4 结 论

使用纳秒脉冲激光对铸铁表面的水性防锈漆进行激光清洗,研究了激光除漆工艺参数对除漆后表

面形貌、表面粗糙度和除漆率的影响规律。得到以下结论:1)随着激光功率增大,漆层表面温升增加,基底熔融面积增大,除漆效果明显,但表面氧化现象更显著,表面粗糙度存在增大的趋势。2)当激光功率和除漆速度一定时,随着脉冲频率增大,漆层发生焦化,生成抗烧蚀层,除漆率明显降低;而除漆速度逐渐降低时,除漆过程由振动和热烧蚀效应的共同作用转变为以热烧蚀效应为主,导致除漆后的表面粗糙度和除漆率均出现先减小后增大的变化趋势。3)在本文试验条件下,最优的激光除漆参数为激光功率 50 W,脉冲频率 90 kHz,除漆速度 7000 mm/s,此时除漆率为 99.4%。

参 考 文 献

- [1] Ye Y Y, Qi Y, Yuan X D, *et al.* Laser cleaning of the contamination on the surface of sandstones and optics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(s1): s103006.
叶亚云, 齐扬, 袁晓东, 等. 利用激光清洗技术清除砂岩及光学元件表面污染物[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s103006.
- [2] Zhang Z Y, Wang Y B, Liang H, *et al.* Removal of low thermal conductivity paint with high repetition rate pulse laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102009.
张志研, 王奕博, 梁浩, 等. 高重复频率脉冲激光去除低热导率涂漆[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102009.
- [3] 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.
- [4] Xu B S. Remanufacturing technology and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
徐滨士. 再制造技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [5] Watkins K G. Mechanisms of laser cleaning [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3888: 165-174.
- [6] Li X K, Zhang Q H, Zhou X Z, *et al.* The influence of nanosecond laser pulse energy density for paint removal[J]. Optik, 2018, 156: 841-846.
- [7] Autric M L, Oltra R. Basic processes of pulsed laser materials interaction: applications to laser cleaning of oxidized surfaces [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5777: 982-985.
- [8] Shi S D, Du P, Li W, *et al.* Research on paint

- removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9): 0903001.
- 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): 0903001.
- [9] Zou W F, Xie Y M, Xiao X, *et al.* Application of thermal stress model to paint removal by Q-switched Nd:YAG laser[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(7): 074205.
- [10] Wang D L, Feng G Y, Deng G L, *et al.* Study of mechanism on laser paint removal based on the morphology and element composition of ejected particle [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1003007.
- 王德良, 冯国英, 邓国亮, 等. 基于颗粒形貌及成分分析的激光除漆去除机理研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003007.
- [11] Li X, Huang T, Chong A W, *et al.* Laser cleaning of steel structure surface for paint removal and repaint adhesion [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(3): 340-344.
- [12] Brygo F, Dutouquet C, Le Guern F, *et al.* Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation [J]. Applied Surface Science, 2006, 252(6): 2131-2138.
- [13] Schmidt M J J, Li L, Spencer J T. An investigation into the feasibility and characteristics of using a 2.5 kW high power diode laser for paint stripping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 138(1/2/3): 109-115.
- [14] Jasim H A, Demir A G, Previtali B, *et al.* Process development and monitoring in stripping of a highly transparent polymeric paint with ns-pulsed fiber laser [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 93: 60-66.
- [15] Shamsujjoha M, Agnew S R, Melia M A, *et al.* Effects of laser ablation coating removal (LACR) on a steel substrate: part 1: surface profile, microstructure, hardness, and adhesion [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 281: 193-205.
- [16] Watkins K G, Curran C, Lee J M. Two new mechanisms for laser cleaning using Nd:YAG sources [J]. Journal of Cultural Heritage, 2003, 4: 59-64.
- [17] Xia P Y, Yin Y H, Cai A J, *et al.* Laser cleaning process of 2219 aluminum alloy anodic oxide film before welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102005.
- 夏佩云, 尹玉环, 蔡爱军, 等. 2219 铝合金阳极氧化膜焊前激光清洗工艺研究 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102005.
- [18] 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.
- [19] Tong Y Q, Zhang A, Huang J Y, *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.
- 佟艳群, 张昂, 黄建宇, 等. 焊前激光预处理的铝合金表面氧含量的分布及影响 [J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0202003.
- [20] AlShaer A W, Li L, Mistry A. The effects of short pulse laser surface cleaning on porosity formation and reduction in laser welding of aluminium alloy for automotive component manufacture [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64: 162-171.
- [21] Sun C W, Lu Q S. Laser irradiation effect [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 44-55, 65-78.
- 孙承伟, 陆启生. 激光辐照效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 44-55, 65-78.