

不同激光清洗方法对高强钢表面锈蚀层的去除研究

雷正龙, 孙浩然, 陈彦宾*, 田泽

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 采用干式/液膜辅助式激光清洗方法对高强钢表面的锈蚀层进行处理,研究了激光功率对试样表面状态的影响规律,并对两种方法的除锈机理进行了对比分析。结果表明:两种清洗方法都能有效去除试样表面的锈蚀层,且低功率下液膜辅助式激光清洗效果比干式激光清洗效果更好。优化的液膜辅助式激光除锈工艺参数为:激光功率 400 W,脉冲频率 10 kHz,脉宽 30 ns,此时试样表面氧元素的质量分数为 3.38%,试样的表面粗糙度为 3.04 μm 。

关键词 激光技术; 锈蚀层; 干式激光清洗; 液膜辅助激光清洗; 表面质量

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0702003

Elimination of Rusting Layer from High-Strength Steel Surface Using Different Laser Cleaning Methods

Lei Zhenglong, Sun Haoran, Chen Yanbin*, Tian Ze

State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract We investigate dry and liquid film-assisted laser cleaning methods and elucidate the influence of laser power on the state of a specimen surface. We also compare the derusting mechanisms of the two methods. The results denote that both the aforementioned methods can effectively eliminate the rusting layer on a sample surface, and the effect of liquid film-assisted laser cleaning at low power is better than that of the dry laser cleaning. The optimized liquid film-assisted laser cleaning process parameters include a laser power of 400 W, pulse frequency of 10 kHz, and pulse width of 30 ns. Under these conditions, the oxygen content of the sample surface is reduced to 3.38%, and the surface roughness is observed to be 3.04 μm .

Key words laser technique; rusting layer; dry laser cleaning; liquid film-assisted laser cleaning; surface quality

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 140.3538

1 引 言

钢材是人类使用最多的金属材料,在社会生产生活的各个领域都有着广泛应用。然而,钢在使用过程中极易发生锈蚀,高强钢表面的锈蚀会加速其内部的腐蚀,带来巨大的经济损失和安全隐患^[1-2]。在 高 强 钢 的 使 用 过 程 中,必 须 清 除 其 表 面 的 锈 蚀 层,使其表面满足一定的洁净度,延长钢结构使用寿命的同时,为后续加工制造工艺(如焊接、喷漆等)做准备^[3-4]。传统的除锈方法包括机械打磨、喷砂、酸洗等,但这些方法难以完全满足应用的需求^[5-6],如机械打磨和喷砂会对基材表面造成损伤,而酸洗则会

造成环境污染。

激光清洗技术是一种新型的表面污染物去除技术,具有绿色环保、清洗效果佳、应用范围广、精度高、非接触式和基材损伤可控等突出优势^[7-9],广泛应用于航空航天、汽车船舶、微电子及文物保护等领域^[10-13],用以去除材料表面的油漆、氧化物等污染物。激光除锈方法主要包括激光干式除锈和液膜辅助式激光除锈^[14]。干式激光清洗是指激光能量直接作用在污染物的表面,使污染物吸收激光能量发生气化、分解、热膨胀、振动等物理化学变化,达到污染物从基材表面剥离、破碎脱落的同时也不损伤基材的目的。液膜辅助式激光清洗则是在基材表面预

收稿日期: 2018-12-27; 修回日期: 2019-01-20; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFB1105000)

* E-mail: chenyb@hit.edu.cn

制一层液膜,当激光作用于液膜上时,瞬时的热作用使液膜产生激烈的气化、爆炸,通过沸腾与爆炸产生的冲击力使污染物破碎、脱落,并随高速流动的气化物一起被清除。目前,关于激光除锈的研究主要集中在激光干式除锈^[15-17],仅有少量研究报道了液膜辅助式激光除锈。文献[18]中采用不同的液膜对硅表面的微米级颗粒进行清洗实验,结果发现水作为液膜时,可以在更低的激光功率下去除微粒。田彬等^[19]对激光湿法除锈进行了尝试,结果发现湿法除锈可以明显提高效率,但除锈后试样表面有水残留,会产生返锈现象。李伟^[20]提出了一种双光束激光湿式除锈方法,采用该方法进行实验研究后发现,前一束激光在液膜辅助下的除锈效率得以提高,后一束激光去除残余的液膜,实现了钢铁的主动氧化钝化,避免了二次腐蚀。

本文分别采用干式和液膜辅助式两种激光清洗方法进行除锈实验,对除锈过程中的激光清洗特性、不同功率下得到的清洗表面的化学成分与形貌进行分析,得到了合适的除锈工艺参数;将两种激光清洗方法进行对比,研究液膜对除锈效果及除锈过程的影响,以得到一种效率更高的激光除锈方法。

2 实验方法

2.1 实验设备及材料

本研究采用波长为 1064 nm 的纳秒级光纤脉冲激光器,脉冲宽度为 30 ns,脉冲频率范围在 2~50 kHz 范围内可调,最大平均功率为 1000 W。实

验系统如图 1 所示,激光器发出的脉冲激光先经过一个透镜变为平行光束,然后经由扫描振镜系统反射后再经聚焦照射到污染物的表面。通过控制扫描振镜的摆动可以对激光清洗区域的形状和大小进行控制。

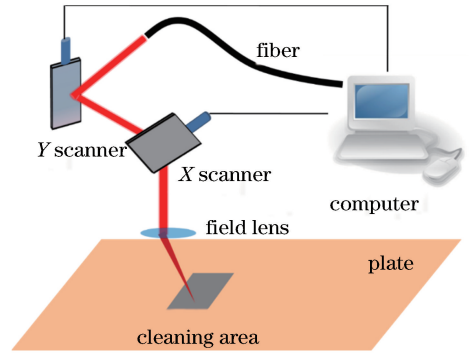


图 1 激光清洗设备结构示意图
Fig. 1 Structural diagram of laser cleaning equipment

本研究采用的试样为自然状态下锈蚀的高强钢 Q460,采用扫描电镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)对锈蚀层的表面形貌、主要化学成分进行分析,结果如图 2(b)、(c)所示,锈蚀层的主要成分为 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 。从 SEM 照片可以看出,锈蚀层内部有大量缝隙,膜层结构疏松,无法阻止水和氧气的侵入,会加速内层的腐蚀。可见,锈蚀层并不是均匀分布在试样表面的,而是从表面向腐蚀出的孔洞中生长,孔洞中的氧化膜比表面的氧化层更难去除,而且去除后还会在表面留下损伤。

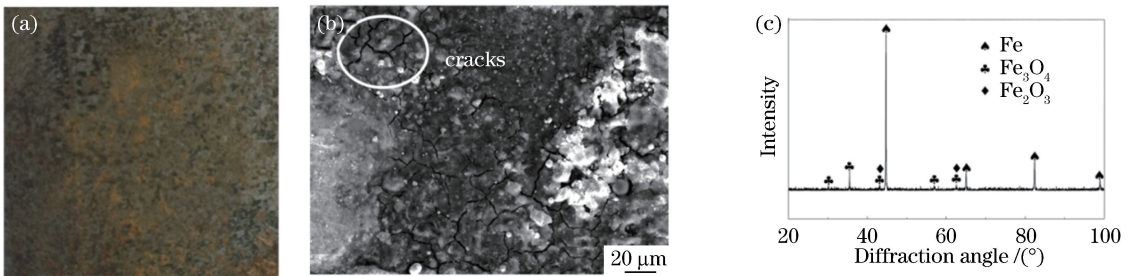


图 2 锈蚀层的形貌及成分分析。(a)宏观形貌;(b) SEM 图像;(c) X 射线衍射峰
Fig. 2 Morphology and composition analysis of rusting layer. (a) Macro morphology;
(b) SEM image; (c) X-ray diffraction peak

2.2 实验方法

激光清洗过程中温度场的时空分布主要受激光能量密度的影响,因此主要针对不同功率下的激光清洗特性与效果进行研究,各组实验采用相同的脉冲频率、脉冲宽度和扫描速度,通过设置不同的激光功率来实现激光能量密度的变化。

光斑间距 d 的计算公式为 $d = \frac{v}{f}$,其中, v 为扫描速度, f 为脉冲频率,可计算得到光斑间距为 $300 \mu\text{m}$ 。直径 $D = 960 \mu\text{m}$ 的光斑的搭接情况如图 3 所示。通过较高的光斑搭接率,后一个脉冲可对前一个光斑区域再次加热,从而在液膜辅助式激

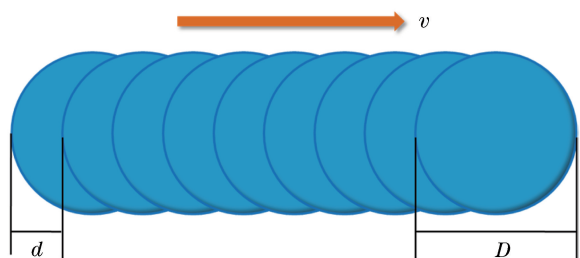


图 3 光斑搭接示意图

Fig. 3 Diagram of light spot lapping

光除锈过程中确保试样表面的水分蒸发,防止试样返锈。在液膜辅助式激光除锈实验中,采用喷雾的方法使液滴均匀地分布在试样表面。清洗区域是尺寸为 10 mm×20 mm 的矩形。通过控制施加液体的体积来控制液膜的厚度,在每个试样上施加

0.05 mL 的液体,则液膜厚度约为 0.25 mm。

3 实验结果与讨论

3.1 锈蚀层激光清洗特性分析

为研究不同方法的激光清洗特性,在除锈时用高速摄影仪对除锈过程进行拍摄,照片如图 4 所示,激光作用部位用白圈标记。液膜辅助式激光清洗过程中,在未清洗部分可以观察到分布在试样表面的水珠,在高速摄像下呈发亮的小点,激光作用部位的锈蚀层碎片从基材表面剥离后呈爆炸状向四周飞溅。在干式激光清洗过程中也能观察到从基材表面剥离的锈蚀层碎片,但碎片尺寸较小,未观察到碎片的剧烈飞溅现象。从高速摄像照片中也可以看出液膜辅助式激光除锈后的试样表面更加洁净光亮。

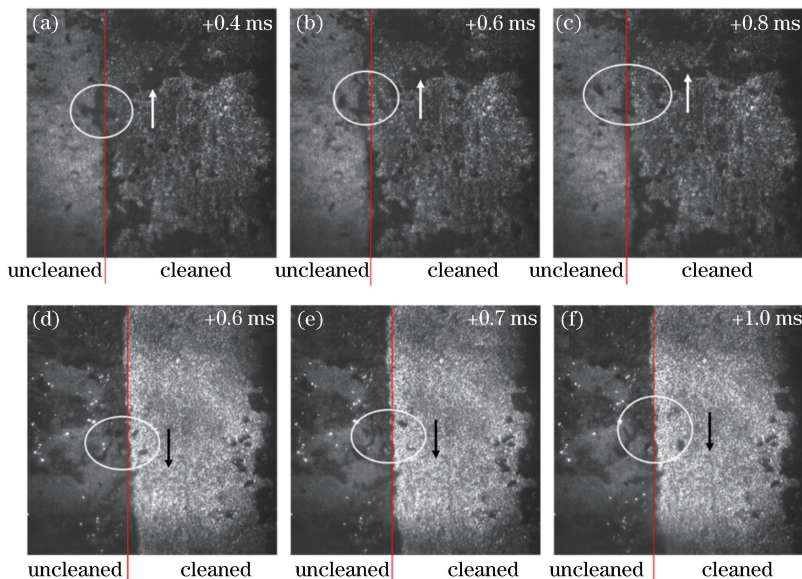


图 4 两种激光清洗方法下不同时刻的高速摄像照片。(a)~(c)干式激光清洗;(d)~(f)液膜辅助式激光清洗

Fig. 4 High-speed photography photos at different time under both of two laser cleaning methods.

(a)-(c) Dry laser cleaning; (d)-(f) liquid film-assisted laser cleaning

除锈后通过肉眼观察除锈后钢板的表面宏观形貌可以初步对除锈效果进行判断,锈蚀钢板的表面为黄褐色,钢板本身的颜色为银白色。根据 GB/T 8923.1—2011《涂覆涂料前钢材表面处理表面清洁度的目视评定》对除锈效果进行评价。

从图 5 可以看出:采用干式激光清洗工艺,当激光功率为 100 W 时,试样表面的黄褐色锈迹基本被除去,但试样表面呈黑色;继续加大功率,黑色褪去,当功率达到 400 W 时,试样表面颜色比较接近钢板本身的颜色;采用水作为液膜进行激光除锈实验,当激光功率为 100 W 时,试样表面的颜色呈暗灰色,更接近基体的颜色(与激光干式除锈试样相比);随

着功率增加,钢板的颜色逐渐向基材本身的颜色转变。将实验结果与 GB/T 8923.1—2011 进行对比后可知,在合适的工艺参数下,两种方法均能达到 Sa 3 的除锈效果,但在低功率下,液膜辅助式激光除锈的效果明显优于激光干式除锈。

3.2 激光清洗方法对锈蚀层表面形貌的影响

从图 6 中可以看出:当激光功率为 100 W 时,从整体上看,基材表面的锈蚀部分被清除,大部分区域裸露出平坦的基材,但局部区域在腐蚀过程中产生了腐蚀坑,少量锈蚀嵌入腐蚀坑中,这部分锈蚀残留下来,未被完全去除;当激光功率为 300 W 时,部分腐蚀坑内的锈蚀得以去除,在试样表面留下孔洞,

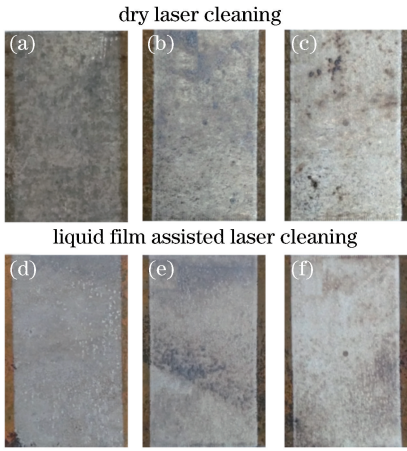


图 5 不同工艺参数下激光除锈试样的表面形貌。

(a)(d) 100 W; (b)(e) 300 W; (c)(f) 400 W

Fig. 5 Surface morphologies of laser derusting samples at different process parameters. (a)(d) 100 W; (b)(e) 300 W; (c)(f) 400 W

但锈蚀去除得仍不彻底,仍能观察到残留在腐蚀坑中的氧化物;当功率上升到 400 W 时,试样表面的氧化膜基本去除干净,表面有较多的细小孔洞,且表面发生了重熔现象。

从图 7 中可以看出:当液膜辅助式激光清洗功率为 100 W 时,试样表面的氧化膜层基本被去除,

在表面留下了深度较浅的腐蚀坑;随着激光功率增加,液膜迅速沸腾,产生的爆炸力增强,能够去除的锈蚀层厚度增加,导致试样表面出现更多较深的腐蚀坑,但由于激光功率达到 300 W 时试样出现重熔现象,表面的凹坑开始消失,试样表面趋于平坦。

采用两种方法在不同的激光功率下进行激光除锈后,试样的表面粗糙度如图 8 所示,可见:随着功率增加,激光干式除锈试样的表面粗糙度增大;以水作为液膜时,激光除锈后试样的表面粗糙度随激光功率增加先增大后减小。分析认为:在较低的激光功率下,试样表面腐蚀坑内的锈蚀被去除,导致试样表面凹凸不平,粗糙度增加;在较高的激光功率下,锈蚀被去除后,激光能量使基体发生重熔,液膜辅助式激光除锈时的主要机制为液膜的迅速蒸发和相爆炸,爆炸时在基体表面产生侧向力,利于熔融金属的铺展,熔融金属可以有效填充腐蚀产生的坑洞,使试样表面的粗糙度减小;对于干式激光清洗,当激光功率较高时,主要通过锈蚀的气化和烧蚀对基体内部的锈蚀进行去除,嵌入基体内部的锈蚀气化逸出,排开表面的熔融金属,使孔洞无法有效地被熔融金属填充,因此表面粗糙度增大。

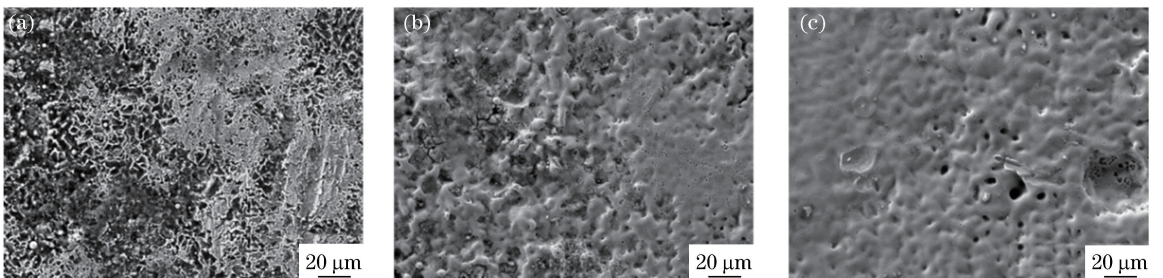


图 6 不同功率下干式激光清洗试样的表面 SEM 形貌。(a) 100 W; (b) 300 W; (c) 400 W

Fig. 6 Surface SEM morphologies of dry laser cleaning samples under different powers. (a) 100 W; (b) 300 W; (c) 400 W

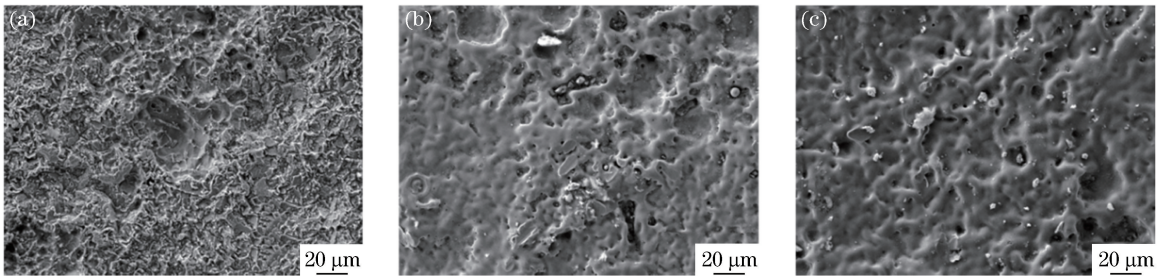


图 7 不同功率下液膜辅助式激光清洗试样的表面 SEM 形貌。(a) 100 W; (b) 300 W; (c) 400 W

Fig. 7 Surface SEM morphologies of liquid film-assisted laser cleaning samples under different powers.

(a) 100 W; (b) 300 W; (c) 400 W

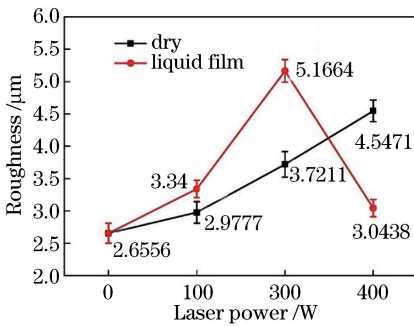


图 8 不同激光清洗方法除锈前后试样的表面粗糙度

Fig. 8 Surface roughness of sample before and after different laser cleaning methods

3.3 激光清洗方法对锈蚀层成分的影响

锈蚀层的主要成分为氧化物,试样表面氧元素含量的变化可以更加直观有效地反映锈蚀的去除程度,通过能谱分析得到不同实验参数下试样表面的氧元素含量,如图 9 所示。可见:未除锈试样表面氧元素的质量分数为 30.09%;当激光功率为 100 W 时,相比于激光干式除锈,相同能量密度下液膜辅助式除锈后试样表面氧元素的质量分数降低了 43%;随着激光功率增加,两种方法的除锈效果逐渐接近,当激光功率达到 400 W 时,两种方法除锈后试样表面氧元素的质量分数均低于 4%。

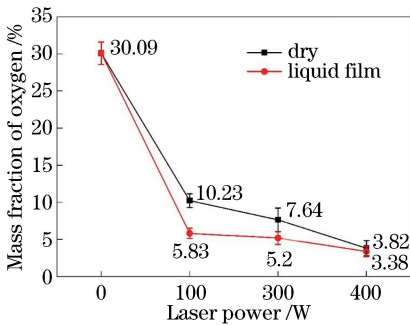


图 9 激光清洗后试样表面的氧元素含量

Fig. 9 Oxygen content of sample surface after laser cleaning

采用干式激光清洗和液膜辅助式激光清洗,在 400 W 的激光功率进行除锈后,对试样进行 XRD 分析,通过表面的物相成分来确定锈蚀层是否被清除干净。除锈后的试样与锈蚀层的衍射峰如图 10 所示,可以看出,除锈后试样的 X 射线衍射谱中,锈蚀层中氧化物对应的衍射峰均消失,这说明激光功率为 400 W 时,两种方法都有效地去除了试样表面的锈蚀层。

4 结 论

采用干式/液膜辅助式激光清洗方法对高强度

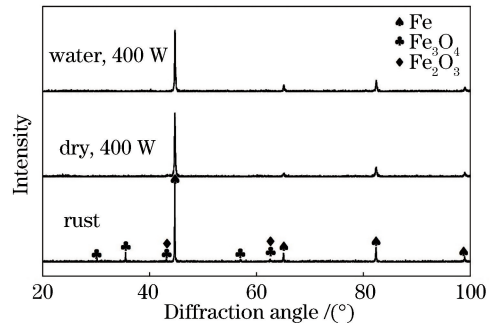


图 10 除锈后试样与锈蚀层的 X 射线衍射峰对比

Fig. 10 X-ray diffraction peak contrast of rusting layer and laser derusting sample

表面的锈蚀层进行处理,并对两种除锈方法的特性进行研究。在两种方法除锈过程中均可发现从基材表面剥离的锈蚀层碎片。在液膜辅助式激光除锈过程中,锈蚀层呈爆炸状从基材表面剥离,除锈后试样表面比干式除锈试样更加光亮。对除锈后试样表面的形貌、化学成分进行分析发现:随着激光功率增加,嵌入基材的锈蚀逐渐被去除,试样表面留下腐蚀坑;当激光功率达到 400 W 时,两种方法均能够有效去除基材表面的锈蚀,试样表面发生了重熔现象。液膜辅助式激光清洗方法在低功率下的除锈效果显著优于干式激光清洗方法,可以去除试样表面及腐蚀坑内部的锈蚀,而干式激光清洗只能去除基材表面的锈蚀,对于嵌入腐蚀坑内内部的锈蚀需较高的激光功率才能去除。另外,还研究了两种清洗方法下激光功率对除锈后试样表面粗糙度的影响。液膜辅助式激光清洗是一种优质、高效的除锈方法,具有较高的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Sun S J, Chen W M, Yi S Z, *et al.* Study of the corrosion protection behavior of neutral water-based rust remover on carbon steel [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 558: 130-137.
 - [2] Li J F, Ge S S, Wang J X, *et al.* Water-based rust converter and its polymer composites for surface anticorrosion [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 537: 334-342.
 - [3] 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.
- [4] 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): 102005.
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): 102005.
- [5] Yu H B, Wang C M, Wang J, *et al.* Research on the laser de-rusting 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.
- [6] Rajendran S. Biotechnology for rust free iron metal surface[J]. APCBEE Procedia, 2012, 3: 245-249.
- [7] Xing H N, Ran H L, Zhao H F, *et al.* Development and application of laser cleaning technology [J]. Cleaning World, 2018, 34(5): 23-31.
邢宏楠, 冉合利, 赵慧峰, 等. 激光清洗技术发展及应用[J]. 清洗世界, 2018, 34(5): 23-31.
- [8] Zapka W, Ziemlich W, Tam A C. Efficient pulsed laser removal of 0.2 μm sized particles from a solid surface[J]. Applied Physics Letters, 1991, 58(20): 2217-2219.
- [9] Zhou X, Imasaki K, Furukawa H, *et al.* A study of the surface products on zinc-coated steel during laser ablation cleaning [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 137(2/3): 170-174.
- [10] Salimbeni R, Pini R, Siano S. Achievement of optimum laser cleaning in the restoration of artworks: expected improvements by on-line optical diagnostics[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2001, 56(6): 877-885.
- [11] Pouli P, Fotakis C, Hermosin B, *et al.* The laser-induced discoloration of stonework; a comparative study on its origins and remedies[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2008, 71(3): 932-945.
- [12] Daurelio G, Chita G, Cinquepalmi M. New laser surface treatments: cleaning, derusting, deoiling, depainting, deoxidizing, and degreasing [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3097: 369-391.
- [13] Maravelaki P V, Zafirooulos V, Kilikoglou V, *et al.* Laser-induced breakdown spectroscopy as a diagnostic technique for the laser cleaning of marble [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 1997, 52(1): 41-53.
- [14] 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.
- [15] Psyllaki P, Oltra R. Preliminary study on the laser cleaning of stainless steels after high temperature oxidation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 282(1/2): 145-152.
- [16] Xie Y F, Liu H W, Hu Y X. Determining process parameters for laser derusting of ship steel plates[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403008.
解宇飞, 刘洪伟, 胡永祥. 船舶板材激光除锈工艺参数确定方法研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403008.
- [17] Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Parameters and surface performance of laser removal of rust layer on A3 steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 166(1): 10-16.
- [18] Tam A C, Leung W P, Zapka W, *et al.* Laser-cleaning techniques for removal of surface particulates [J]. Journal of Applied Physics, 1992, 71(7): 3515-3523.
- [19] Tian B, Zou W F, Liu S J, *et al.* Introduction of rust removed by dry laser cleaning [J]. Cleaning World, 2006, 22(8): 33-38.
田彬, 邹万芳, 刘淑静, 等. 激光干式除锈[J]. 清洗世界, 2006, 22(8): 33-38.
- [20] Li W. Research on mechanisms of laser rust removal and manufacture of laser cleaning devices [D]. Tianjin: Nankai University, 2014.
李伟. 激光清洗锈蚀的机制研究和设备开发[D]. 天津: 南开大学, 2014.