

激光与光电子学进展

连续激光清洗 Q235B 碳钢锈蚀层的工艺参数对表面质量的影响

吴秋培, 孙向阳, 孙家坡, 韩良华, 刘列*

南华大学机械工程学院, 湖南 衡阳 421001

摘要 采用 1080 nm 连续激光器对 Q235B 碳钢上的锈蚀层进行清洗, 研究了激光功率以及清洗速度对清洗后试样的表面宏观与微观形貌的影响, 分析了不同工艺参数对粗糙度的影响规律, 并对清洗后的试样表面进行截面金相观察、元素含量以及物相分析, 并结合电化学分析以及硬度检测发现, 在清洗速度恒为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、激光功率为 4 kW 时, 试样表面粗糙度最小为 $3.94 \mu\text{m}$, Fe 含量处于峰值, O 含量处于谷值, 激光清洗效果最好。当激光功率恒为 7 kW、清洗速度由 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增至 $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 试样表面粗糙度先减小后增大, 在清洗速度为 $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时达到最小为 $3.68 \mu\text{m}$, 此时激光单次扫描就能完全清洗锈蚀层, 其清洗效率为 $20.6 \text{ m}^2/\text{h}$ 。清洗后的基材表面产生重熔层, 这使得锈蚀层清洗后基材表面的耐腐蚀性有相应提高, 且其硬度在激光功率为 7 kW、清洗速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时相比钢材本身提升接近 4 倍。在 Ansys 中建立连续矩形光斑激光清洗模型, 并与实验结果对比分析, 可以通过该模型为高功率连续激光清洗工艺参数提供选择和效果预估。

关键词 激光器与激光光学; 连续激光; 激光清洗; 粗糙度; 重熔层; 耐腐蚀性

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222926

Effect of Continuous Laser Cleaning Process Parameters on Surface Quality of Q235B Carbon Steel Rust Layer

Wu Qiupei, Sun Xiangyang, Sun Jiapo, Han Lianghua, Liu Lie*

School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China

Abstract In this study, the effects of laser power and cleaning speed on the surface macro- and micromorphology of Q235B carbon steel after the rust layer was cleaned with a continuous laser at 1080 nm, are investigated. Moreover, the effect of different process parameters on roughness is analyzed, and cross-sectional metallographic observations, element content, and compound analysis of the cleaned sample surface are carried out. From hardness test and electrochemical analysis, it is found that the minimum roughness of sample surface is $3.94 \mu\text{m}$, and the laser cleaning effect is the best when the cleaning speed is constant at $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, laser power is 4 kW, Fe content is the highest, and O content is the lowest. When the laser power is constant at 7 kW, and the cleaning speed increases from $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ to $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, the surface roughness of the specimen first decreases and then increases. The minimum roughness is $3.68 \mu\text{m}$ when the cleaning speed is $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, at which time the laser can completely clean the rust layer in a single scan, and its cleaning efficiency is $20.6 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$. A remelted layer is generated on the surface of the cleaned substrate, which improves the corrosion resistance of the substrate surface after cleaning the rust layer, and its hardness is approximately 4 times higher than that of the steel when the laser power is 7 kW and the cleaning speed is $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. A continuous rectangular spot laser cleaning model is created using Ansys software and its results are compared with the experimental results to determine the parameters and estimate their effects for the high power continuous laser cleaning process.

Key words laser and laser optics; continuous laser; laser cleaning; roughness; remelted layer; corrosion resistance

1 引言

传统钢材锈蚀层清洗主要有机械处理^[1]和化学处

理^[2]两种方式。机械处理大面积锈迹耗时较长, 而化学清洗过程中产生的废液会造成环境污染, 且两种方法处理后的钢材都有闪锈问题。激光清洗作为一种新

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-12-05; 录用日期: 2022-12-27; 网络首发日期: 2023-01-05

基金项目: 武汉市科技计划项目(2021012002023424)

通信作者: *Reseek206@163.com

的表面处理方法,以其高效、易于自动化、可远程操作等优点受到广泛关注。激光清洗的主要机理^[3]是将高能量密度光斑经过光束整形后照射到待清洗物表面,使其受热膨胀或气化蒸发,从而实现表面清洗。

王凯杰^[4]研究了光斑能量分布对 Q235B 碳钢除锈过程的影响,结果表明,激光清洗锈蚀层的厚度与能量密度有关,即能量密度越大,去除锈蚀层的厚度越深。廖大松等^[5]使用纳秒脉冲激光器对 TC4 钛合金表面污染物进行清洗,结果表明,不同清洗速度下钛合金表面元素含量会发生变化并呈现不同颜色,并使得 TC4 钛合金表面的硬度和耐腐蚀性均有提高。李鑫炎等^[6]分析了不同清洗速度对 Q345 钢激光清洗效果的影响,结果表明,经过清洗后的钢表面含氧量降低,达到清洗效果,微观结构的变化导致表面的电化学腐蚀性能提高。而在激光清洗工业应用中,脉冲激光使用得较多^[7-9]。

然而脉冲激光在大物体的激光清洗应用中,如建筑领域的钢结构等,处理的效率受到限制。为了加强清洗效率,提高激光功率以及激光清洗速度是必须的。Fujita 等^[10]和 Zhuang 等^[11]报道了千瓦量级连续激光在清洗方面的高效性,他们发现由于强烈的热效应,激光束能够熔化并烧蚀金属表面,达到腐蚀产物的去除阈

值。Zhuang 等^[12]的研究表明,使用高功率连续激光对去除腐蚀产物具有良好的清洗效果与效率,同时,金属表面形成了致密的氧化膜,耐腐蚀性能提高。

为了评估高能连续激光的清洗效果以及清洗过程对于基底表面的影响,本文采用高功率连续激光设备辐照锈蚀的碳钢板。在辐照过程中使用不同的激光加工参数,观察激光清洗后钢材的表面形貌和微观结构,并进行电化学耐腐蚀性和硬度检测。建立了有限元仿真模型,通过模拟和实验结果的对比分析,验证了结果的准确性。

2 实验研究

2.1 实验设备和材料

本实验采用 RFL-C20000 型连续光纤激光器,其波长为 1080 nm,最大输出功率为 20 kW,激光清洗时由激光器产生的光束经光纤传输,再通过激光输出头将光束整形为尺寸为 15 mm×1 mm 的矩形光斑,最后利用 KUKA 六轴机器人及其控制系统移动输出头进行清洗。激光清洗辅助装置包括用于激光器输出头的水冷回路、外接高压空气以及保护氩气。激光清洗实验装置如图 1 所示。

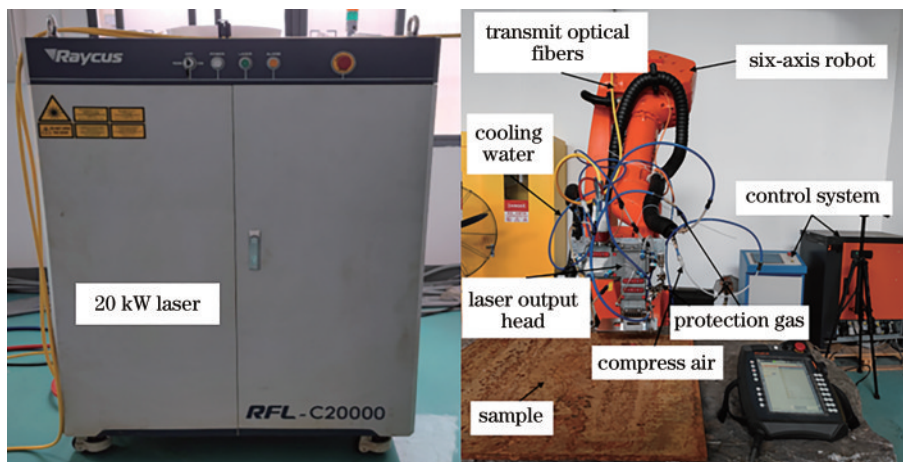


图 1 激光清洗实验装置

Fig. 1 Laser cleaning experimental setup

本文所选实验材料为 Q235B 碳钢,尺寸为 1000 mm×1000 mm×5 mm,其化学成分如表 1 所示。将其放置室外三个月进行自然腐蚀,锈蚀层宏观表面形貌如图 2(a)所示,大量的棕色氧化物及污染物分布在表面,图 2(b)为锈蚀样品的显微形貌图,图 2(c)为部分锈蚀层截面显微图,其锈蚀厚度范围为 40~90 μm。

激光清洗所选工艺参数如表 2 所示,将清洗后的样品利用金相切割机切割成 10 mm×10 mm×5 mm

表 1 Q235B 钢主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of Q235B steel (mass fraction)

C	Si	Mn	P	S
≤0.20	≤0.35	≤1.40	≤0.06	≤0.05

的试样,采用扫描电子显微镜(SEM,日本电子 js-IT100)观察其表面微观形貌。利用激光共聚焦显微镜测量表面粗糙度的变化(ols4100,奥林巴斯),测试范围为 2562 μm×2562 μm。抛光后使用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀,利用 HYZX-2000 金相显微镜观察截面微观组织。采用 X 射线能谱仪(EDS,日本电子 js-IT100)测定清洗前后材料表面的元素含量。利用 X 射线衍射仪(XRD, XD-3)进行物相分析(靶材为 Cu,加速电压为 35 kV,管电流为 30 mA,清洗速度为 2°/min,扫描范围为 20°~90°)。使用 TH320 洛氏硬度计测量清洗过后样品表面硬度(采用金刚石压头,负荷为 1470 N,保持时间为 5 s)。并将待测样品的 10 mm×10 mm 区域作为工作电极、饱和甘汞溶液作为

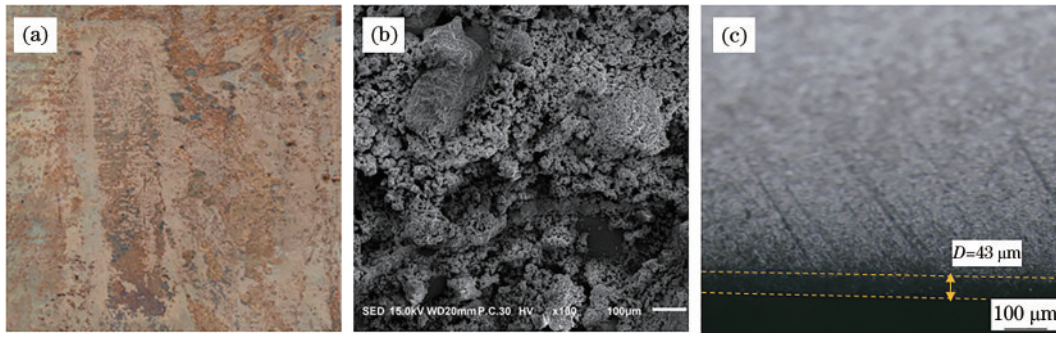


图 2 锈蚀样品。(a)锈蚀表面;(b)显微形貌图;(c)锈蚀层截面显微图

Fig. 2 Rust sample. (a) Rusted surface; (b) microtopography diagram; (c) microscopic diagram of section of rust layer

表 2 激光清洗工艺参数

Table 2 Laser cleaning process parameters

Laser power /kW	2	3	4	5	7	7	7	7	7
Cleaning speed /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	100	100	100	100	100	200	300	400	500
Spot size /($\text{mm}\times\text{mm}$)	15×1								

参比电极,置入质量分数为 3.5% 的 NaCl 电解液中的铂片作为辅助电极,开展基于三电极体系的电化学测试。同时,以开路电位 $\text{OCPE}\pm 300\text{ mV}$ 作为电位变化范围,采样频率为 2.0 Hz,以 3 mV/s 的电位清洗速度测试动电位极化曲线。

2.2 激光功率和清洗速度对 Q235B 表面清洗效果的影响

不同激光功率和清洗速度清洗后的表面形貌如图 3 所示,当清洗速度恒定为 $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、激光功率在 3 kW 及以下时,基材表面还存在一定锈迹,由图 3(a)、3(b)所示,这是由于部分锈蚀层厚度较大,激光功率不足以去除较厚的锈蚀层,此时为欠清洗阶段。从图 3(c)可以看到,当激光功率为 4 kW 时能够去除所有锈蚀层,其表面较为平整,还应注意的是,在冷却后

的数小时内,在激光清洗后表面上没有观察到腐蚀残留物或闪锈。此时为完全清洗阶段,清洗效率为 $5.4\text{ m}^2/\text{h}$ 。如图 3(d)、3(e)所示,当激光功率增加至 5 kW 及以上时,基材表面开始出现“表面波纹”现象,并随激光功率增加而加剧,此时为过清洗阶段,这是由于激光功率过高,在清洗完锈蚀层后仍有多余的能量与基材相互作用使得基材表面熔化而产生的。当激光功率恒为 7 kW、速度在 $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下时,为过清洗阶段,但“表面波纹”现象随速度增加而减缓,如图 3(f)~3(h)所示。如 Anthony 等^[13]以及 Kim 等^[14]和 Sim 等^[15]的实验表明,在钢材表面熔化过程中,熔池表面的温度梯度会产生表面张力梯度,使得熔池周围产生移动的熔融材料流,这种流动会使熔池的剩余表面产生波纹或涟漪。随后,由于激光束的平移,熔融材料

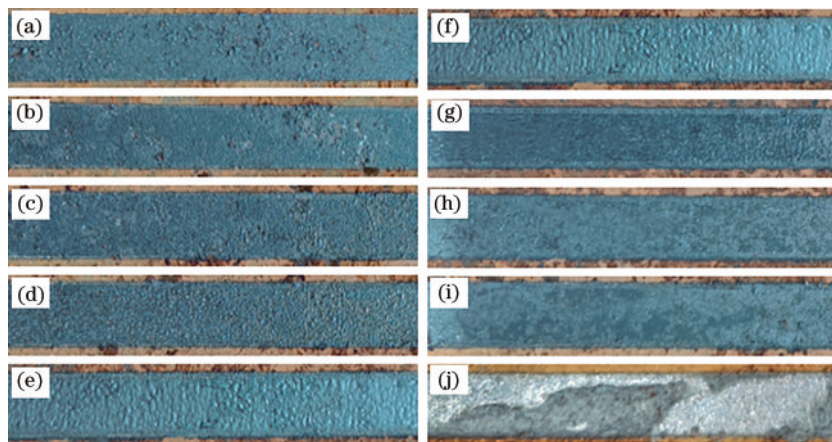


图 3 不同激光功率和清洗速度清洗后的样品宏观形貌。(a) 2 kW, $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) 3 kW, $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) 4 kW, $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) 5 kW, $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (e) 7 kW, $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (f) 7 kW, $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (g) 7 kW, $200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (h) 7 kW, $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (i) 7 kW, $400\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (j) 7 kW, $500\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 3 Macroscopic topography of cleaned samples under different laser powers and cleaning speeds. (a) 2 kW, $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) 3 kW, $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) 4 kW, $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) 5 kW, $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (e) 7 kW, $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (f) 7 kW, $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (g) 7 kW, $200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (h) 7 kW, $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (i) 7 kW, $400\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (j) 7 kW, $500\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

迅速冷却凝固,从而冻结其表面几何形状,最终呈波纹状。上述实验证明了激光束清洗速度存在一个临界值,如果超过该值,则熔凝发生得很快,以至于基材没有产生波纹。即可以在提升激光功率的同时,将清洗速度加大来提高连续激光清洗的效率并获得较为平整的表面。将速度增加至 $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,如图 3(i) 所示,锈迹去除完全且表面平整,此时为完全清洗锈蚀阶段,清洗效率为 $20.6 \text{ m}^2/\text{h}$ 。当清洗速度增加至 $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,如图 3(j) 所示,材料表面出现未清洗完全的锈迹,为欠清洗阶段。这是由于速度过快,表面锈蚀层吸收能量少,激光烧蚀效果减弱未能去除锈蚀层。

不同激光功率和清洗速度下 Q235B 碳钢表面微观形貌如图 4 所示。当清洗速度为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、激光功率分别为 2 kW 和 3 kW 时,清洗试样表面有块状氧化膜残留,以及未去除的锈蚀孔洞,如图 4(a)、4(b) 所

示。在激光功率增加至 4 kW 时,基材表面出现重熔现象以及飞溅的熔化金属颗粒,如图 4(c) 所示,此时表明锈蚀层已被完全去除^[16]。当激光功率为 5 kW 时,基材表面出现明显的金属熔池和烧蚀坑洞,如图 4(d) 所示。这是由于激光功率过高,材料在短时间内气化产生极大的蒸气压力克服熔融材料表面张力引起爆炸飞溅形成坑洞。当激光功率恒为 7 kW 、清洗速度为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,基材出现严重的重熔现象,表面重熔形成如图 3(e) 所示的“表面波纹”。清洗速度大于 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,激光烧蚀效果减弱,表面出现裂纹和烧蚀坑洞,如图 4(f)、4(g) 所示,此时仍为过清洗状态。清洗速度增加至 $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,基材表面出现熔融金属颗粒,此时能去除表面全部锈蚀层。当激光功率为 7 kW 、速度为 $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,清洗试样表面出现块状氧化膜,这是由于表面锈蚀层吸收能量后部分熔化未能完全去除所致。

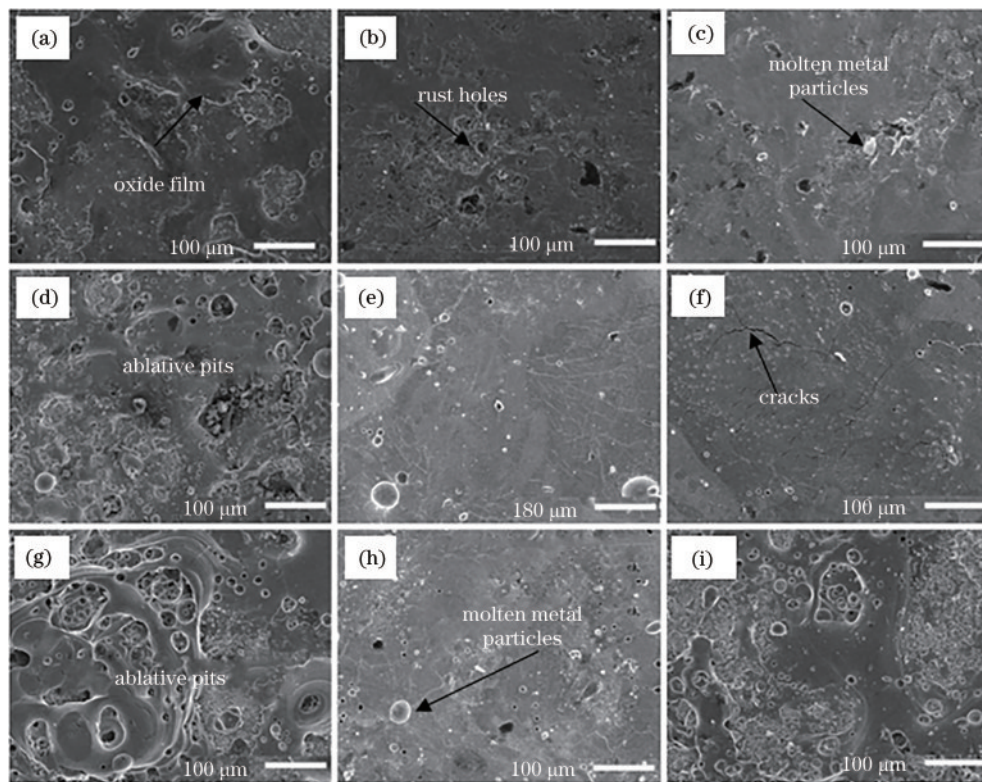


图 4 不同激光功率和清洗速度清洗后的样品表面的 SEM 图。(a) 2 kW , $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) 3 kW , $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) 4 kW , $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) 5 kW , $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (e) 7 kW , $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (f) 7 kW , $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (g) 7 kW , $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (h) 7 kW , $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (i) 7 kW , $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 4 SEM images of sample surface after cleaning with different laser powers and cleaning speeds. (a) 2 kW , $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) 3 kW , $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) 4 kW , $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) 5 kW , $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (e) 7 kW , $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (f) 7 kW , $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (g) 7 kW , $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (h) 7 kW , $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (i) 7 kW , $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

2.3 表面粗糙度及三维形貌

图 5 为激光功率和清洗速度对 Q235 表面粗糙度的影响。如图 5(a) 所示,当清洗速度恒为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、激光功率为 4 kW 时,其粗糙度最低为 $3.94 \mu\text{m}$,此时试样的三维表面如图 6(b) 所示。而激光功率增加至 7 kW 时,由于其强烈的热效应,试样表面形成“表面波

纹”,导致其粗糙度变高为 $6.75 \mu\text{m}$,三维表面如图 6(c) 所示。如图 5(b) 所示,当激光功率恒为 7 kW 时,表面粗糙度随速度增加呈现先降低后增加的趋势,清洗速度为 $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,粗糙度最低为 $3.68 \mu\text{m}$,三维形貌如图 6(d) 所示。当清洗速度增加至 $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,由于其未能清洗多余锈蚀层,导致其粗糙度增加。

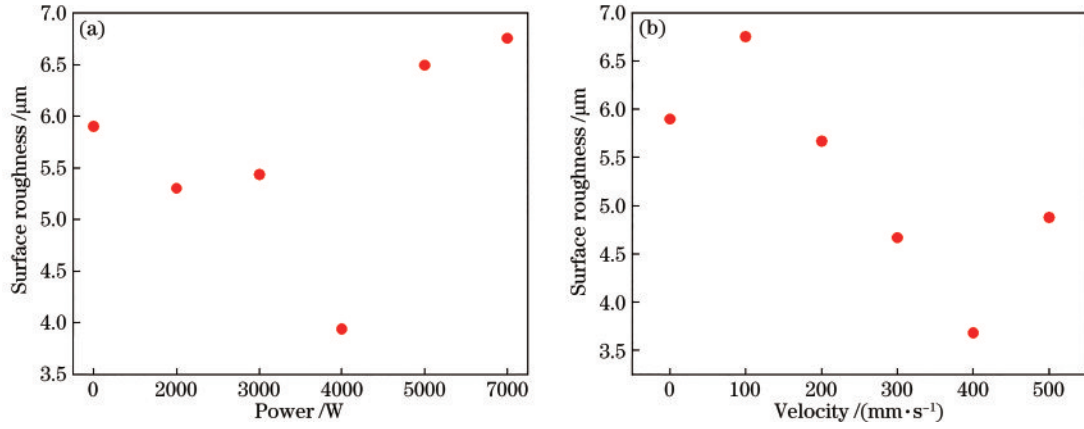


图 5 清洗后样品表面的粗糙度。(a)速度恒定为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的不同功率;(b)功率恒定为 7 kW 下的不同速度
Fig. 5 Roughness of sample surface after cleaning. (a) Different powers at a constant speed of $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) different speeds at a constant power of 7 kW

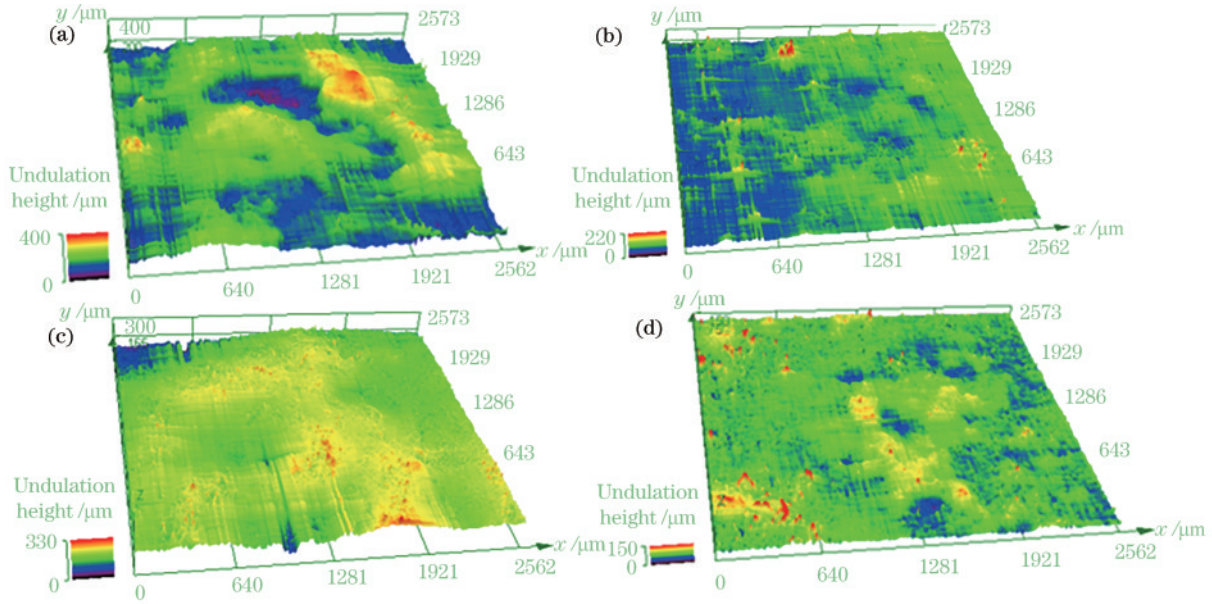


图 6 不同工艺参数下清洗试样的三维形貌。(a)未清洗;(b) $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 4 kW ; (c) $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 7 kW ; (d) $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 7 kW
Fig. 6 Three-dimensional morphology of cleaned specimens under different process parameters. (a) Unclean; (b) $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 4 kW ; (c) $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 7 kW ; (d) $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 7 kW

2.4 清洗后材料表面重熔层及成分分析

重熔层的形成过程如图 7 所示,激光清洗时表面

锈蚀层被去除,同时表层材料急速熔凝形成晶粒细化的重熔层,且在重熔层表面形成了致密的氧化膜。

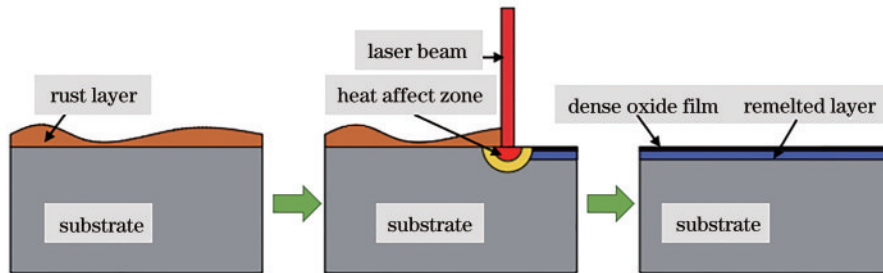


图 7 激光清洗过程中钢材表面重熔层形成示意图

Fig. 7 Schematic diagram of formation of remelted layer on surface of steel during laser cleaning

在截面显微图 8 中可以看出,重熔过的区域与基体材料有明显的分层,重熔区域晶粒细化以及表面带

有一层致密的氧化膜。速度恒定为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,其重熔层深度随激光功率提升而增加,当激光功率增加

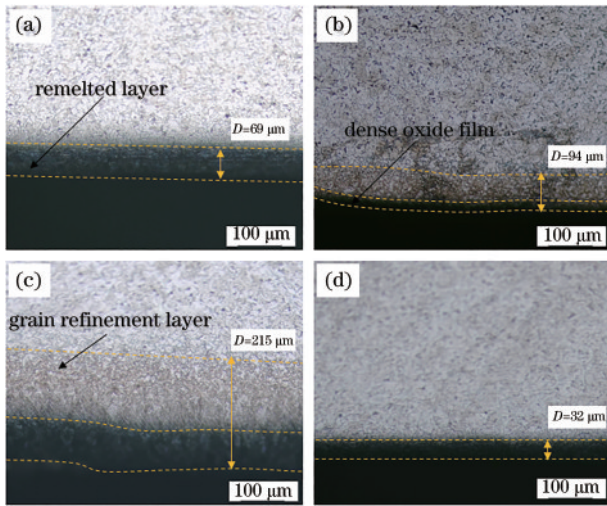


图 8 不同工艺参数下清洗后样品的截面形貌。(a) $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 3 kW; (b) $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 4 kW; (c) $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 7 kW; (d) $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 7 kW

Fig. 8 Cross-sectional topography of cleaned samples under different process parameters. (a) $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 3 kW; (b) $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 4 kW; (c) $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 7 kW; (d) $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 7 kW

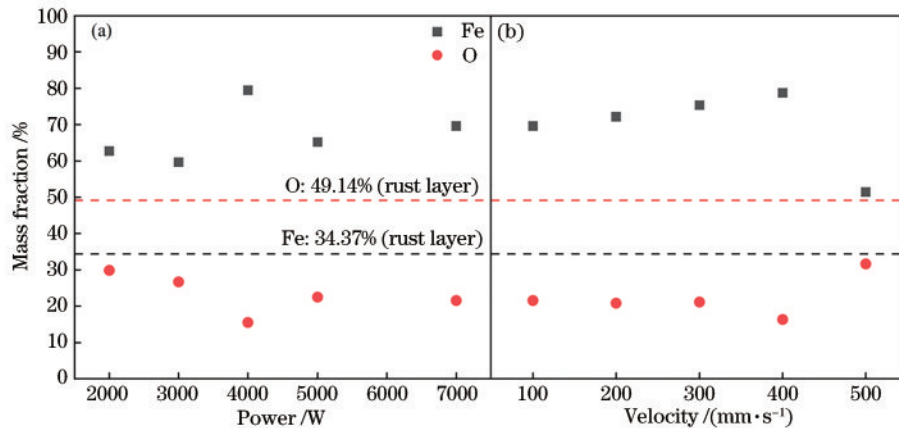


图 9 清洗后样品表面的元素含量。(a) 速度恒定为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 下的不同功率; (b) 功率恒定为 7 kW 下的不同速度

Fig. 9 Elemental content on sample surface after cleaning. (a) Different powers at a constant speed of $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) different speeds at a constant power of 7 kW

采用 XRD 对基材表面进行物相分析以确定清洗效果, 图 10 为不同激光功率和清洗速度对钢材表面 XRD 谱图的影响, 可以看到, 锈蚀层的 XRD 分析显示其成分主要为 Fe_2O_3 与 Fe_3O_4 , 由图 10(a) 可知, 速度恒定为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、激光功率增加至 4 kW 时, Fe_2O_3 衍射峰接近消失, Fe_3O_4 峰值强度较低, 说明此时大量锈蚀层已被去除, 二次氧化最少, 清洗效果较好。当激光功率增加至 7 kW 时, 激光对基材的烧蚀作用加剧, 基材表面二次氧化生成了 Fe_3O_4 。由图 10(b) 可知, 激光功率恒定为 7 kW、速度增加至 $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, Fe_2O_3 与 Fe_3O_4 衍射峰的强度降至最低, 此时清洗效果最好, 当速度增加至 $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 钢材表面的 Fe_2O_3 与 Fe_3O_4 衍射峰强度增加, 这是由于清洗速度过快, 基材锈蚀层

至 7 kW 时其重熔深度达到了 $215 \mu\text{m}$, 如图 8(c) 所示。激光功率恒定为 7 kW、速度从 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 其重熔层深度下降至 $32 \mu\text{m}$ 。重熔的程度随速度增加而减弱。

分别对清洗前后样品的表面进行 EDS 和 XRD 测试, 图 9 为不同激光功率和清洗速度对清洗后钢材表面元素含量的影响。由图 9(a) 可以看出, 在速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、激光功率为 4 kW 时, 铁元素的质量分数从 59.70% 升至峰值 79.47%, 而氧元素的质量分数从 26.70% 降至最低值 15.50%, 说明此时清洗效果最好。速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、激光功率继续增加至 7 kW 时, 氧元素的质量分数上升到 21.58%, 这是由于激光功率过高在激光去除完锈蚀层之后, 激光烧蚀钢材表面形成二次氧化物并渗透进重熔层所致。由图 9(b) 可知, 激光功率恒定为 7 kW、清洗速度增加时, 铁元素的质量分数先增加后降低, 氧元素的质量分数先降低后增加。当速度从 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 提升至 $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 铁元素的质量分数升至峰值 78.77%, 氧元素的质量分数降至谷值 16.32%。

去除不充分所致。

2.5 清洗后材料的表面性能

对清洗过后的材料表面每个从左至右选取 6 个点测量其表面硬度值, 如图 11 所示。

由 11(a) 可以看到, 速度恒定为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 清洗过后材料的硬度随激光功率的提升而增加, 由 8.8 HRC 增加至 34 HRC, 增幅接近 4 倍。这是因为激光功率增加, 熔化深度提高, 重熔深度加深, 从而硬度增加。且其硬度的提升随重熔层的深度增加而提升。由图 11(b) 可以看出, 激光功率恒定为 7 kW 时, 硬度随速度增加而下降, 这是由于速度增加, 重熔深度下降导致硬度降低。

为了进一步了解不同激光功率以及清洗速度对清

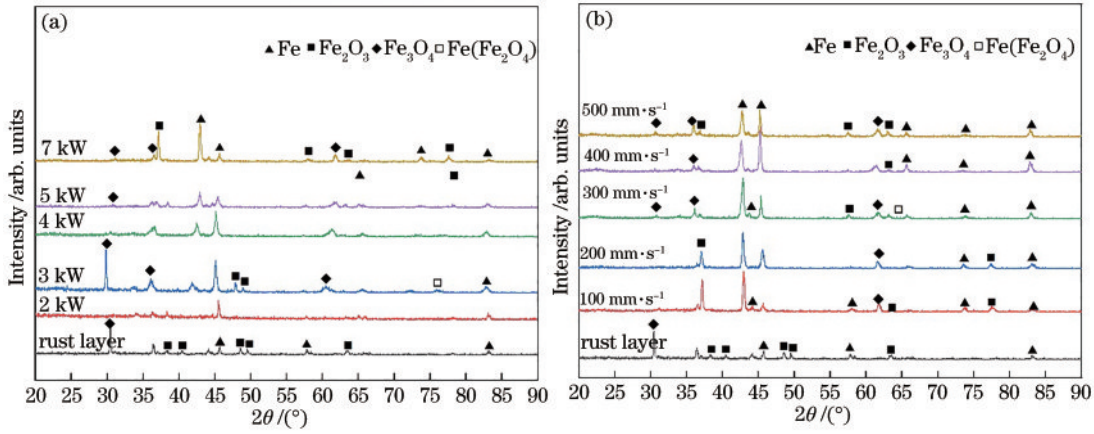


图 10 清洗后样品表面的 XRD。(a)速度恒定为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的不同功率;(b)功率恒定为 7 kW 下的不同速度

Fig. 10 XRD of sample surface after cleaning. (a) Different powers at a constant speed of $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) different speeds at a constant power of 7 kW

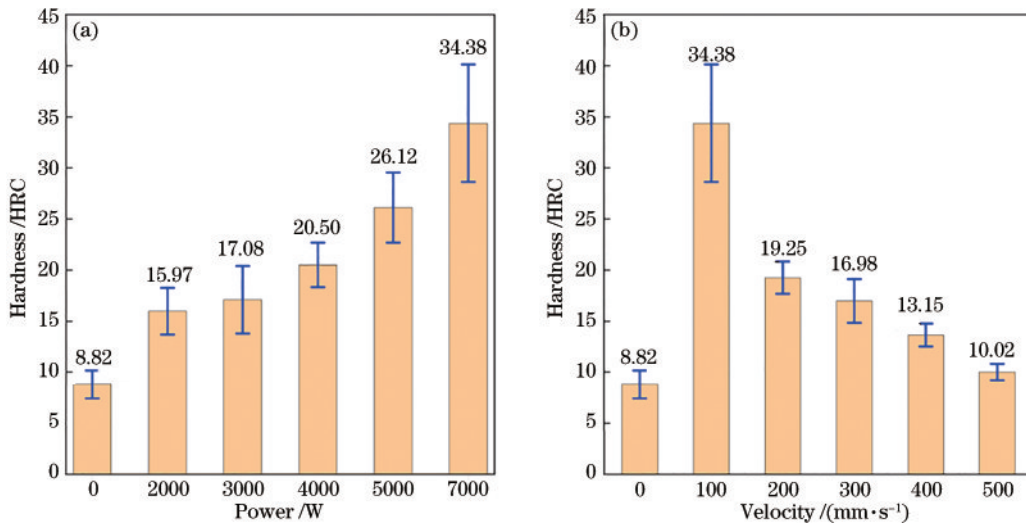


图 11 清洗后样品表面硬度。(a)速度恒定为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的不同功率;(b)功率恒定为 7 kW 下的不同速度

Fig. 11 Surface hardness of sample after cleaning. (a) Different powers at a constant speed of $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) different speeds at a constant power of 7 kW

洗后对钢材表面的影响,分别测试不同工艺参数清洗后的表面的动电位极化曲线如图 12 所示。使用 Tafel 曲线外推法(Tafel 拟合)^[17]得到每一条动电位极化曲线的自腐蚀电位 E_{corr} 和腐蚀电流 I_{corr} ,如表 3 所示, E_{corr} 越大 I_{corr} 越小,可以证明材料的耐腐蚀性越好^[18-19]。

由表 3 可以看到,锈蚀样品的自腐蚀电位为 -1.09 V ,而使用不同工艺参数清洗过后样品的自腐蚀电位均高于锈蚀样品,表明清洗过后的样品腐蚀倾向降低,这是由于锈蚀层疏松多孔的结构为溶解氧提供了通道,并促进了腐蚀反应的进行^[20]。锈蚀样品的自腐蚀电流为 $8.86 \times 10^{-5} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$,除了比激光功率为 7 kW 、清洗速度为 $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的 $7.87 \times 10^{-4} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 小之外,锈蚀样品的自腐蚀电流均比剩余工艺参数清洗后样品的小,说明清洗后样品耐腐蚀性加强,这是由于激光清洗时,锈蚀层被去除且形成重熔层以及致密的氧化膜,抗腐蚀能力增强。在完全清洗锈蚀层阶段,

表 3 不同激光清洗工艺参数下的动电位极化曲线相关参数
Table 3 Corresponding parameters of kinetic potential polarization curve under different laser cleaning process parameters

Power / kW	Speed / (mm·s ⁻¹)	$E_{\text{corr}} / \text{V}$	$I_{\text{corr}} / (\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
2	100	-0.89	1.46×10^{-5}
3	100	-0.87	1.52×10^{-5}
4	100	-0.80	5.60×10^{-6}
5	100	-0.67	6.74×10^{-6}
7	100	-0.71	3.56×10^{-6}
7	200	-0.59	1.28×10^{-5}
7	300	-0.89	6.97×10^{-6}
7	400	-0.82	5.20×10^{-6}
7	500	-0.93	7.87×10^{-4}
Uncleaned sample		-1.09	8.86×10^{-5}

激光功率为 4 kW 、清洗速度为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下和激光功率为 7 kW 、清洗速度为 $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的自腐蚀电

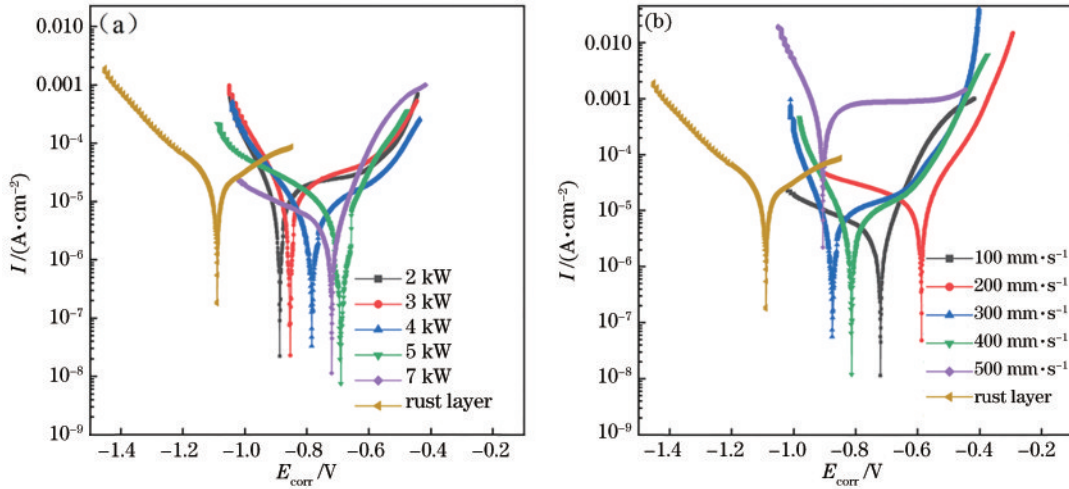


图 12 清洗后样品表面动电位极化曲线。(a)速度恒定为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的不同功率;(b)功率恒定为 7 kW 下的不同速度
Fig. 12 Sample surface kinetic potential polarization curve after cleaning. (a) Different powers at a constant speed of $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) different speeds at a constant power of 7 kW

位分别为 -0.80 V 和 -0.82 V , 比欠清洗阶段激光功率为 2 kW 、清洗速度为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下和激光功率为 3 kW 、清洗速度为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下, 以及激光功率为 7 kW 、清洗速度为 $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的自腐蚀电位 -0.89 V 和 -0.87 V , 以及 -0.93 V 高, 且完全清洗锈蚀层下的腐蚀电流为 $5.60 \times 10^{-6} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $5.20 \times 10^{-6} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 比欠清洗阶段的 1.46×10^{-5} 、 1.52×10^{-5} 、 $7.87 \times 10^{-4} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 低。表明完全清洗锈蚀层阶段的抗腐蚀性能比欠清洗阶段的强。这是由于完全清洗阶段的表面粗糙度比欠清洗阶段的小, 表面反应面积减小^[21]。此外高功率连续激光热作用下形成了较深的重熔层, 过清洗阶段激光功率为 7 kW 、清洗速度为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 尽管其表面出现波纹, 粗糙度较高, 但是由于其重熔层较厚, 其耐腐蚀性比完全清洗锈蚀层阶段的更高。

3 仿真研究

3.1 模型建立

本文锈蚀钢板主要由锈蚀层与钢板基材构成, 在 Ansys 中建立尺寸为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的钢板基材的模型, 并在基材表面构建 $50 \mu\text{m}$ 厚的锈蚀层。为提高计算精度, 将辐照区域的网格作密集划分。几何建模与对其网络划分如图 13 所示。

Q235B 钢材和铁锈的热物性参数如表 4 所示。

激光清洗材料物性受温度影响, 但由于激光作用时间较短, 因此仿真时可以假设:

- 1) 被清洗钢板为连续且各向同性的, 钢材及锈蚀层的热物性参数不随温度改变;
- 2) 不考虑激光清洗过程中产生的等离子体对入射激光能量的屏蔽。

基于傅里叶定律的热传导方程, 在金属靶材的固相阶段, 材料内部的温度场控制方程为

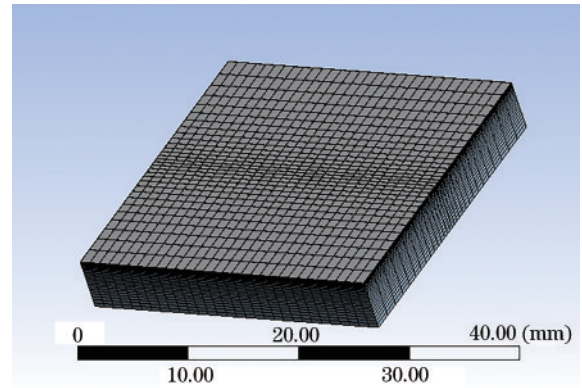


图 13 几何建模与网格划分
Fig. 13 Geometric modeling and meshing

表 4 Q235B 钢板基材和锈蚀层的主要热物性参数^[22]
Table 4 Main thermophysical parameters of Q235B steel plate substrate and rust layer^[22]

Thermophysical parameter	Carbon steel	Rust layer
Density $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7860	5200
Thermal conductivity $k / (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	44.5	4.3
Constant pressure heat capacity $C_p / (\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	600	900
Reflection ratio	0.51	0.20
Absorption ratio	0.49	0.80
Melting temperature T_m / K	1808	1773
Vaporization temperature T_v / K	3133	2973
Latent heat of vaporization $L_v / (\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	6071	4300
Boiling temperature T_b / K	2633	2633
Molar mass M / mol	56	56

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = Q, \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; C_p 为比热; T 为温度; t 为时间; Q 为源项。由于金属对激光吸收的趋肤效应, 其吸收深度远

小于激光波长,将激光热源视为表面热源,因此将式(1)改写为

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) \quad (2)$$

结合实验条件确定方程的初始条件与边界条件。其中初始条件为

$$T_{t=0} = T_{\text{ini}} \quad (3)$$

式中, T_{ini} 为环境初始温度,设置为 300 K,在辐照面处边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha I - h_1(T - T_{\text{ini}}) - \varepsilon \sigma(T^4 - T_{\text{ini}}^4) \quad (4)$$

式中: α 为钢材对激光的吸收率; I 为激光输出热流; h_1 为对流换热系数; ε 为表面发射率; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数。激光为矩形光斑光源,其光强分布^[23]为

$$I(x, y) = I_0 \cdot f_s(x, a, A, B) \cdot f_s[(y - vt), b, C, D] \quad (5)$$

$$f_s(x, a, A, B) = \left[1 + \left(\frac{x}{a} \right)^A \right]^{-B} \quad (6)$$

$$f_s[(y - vt), b, C, D] = \left[1 + \left(\frac{y - vt}{b} \right)^C \right]^{-D} \quad (7)$$

式中: I_0 为理论功率密度,等于激光功率除以光斑面积; a 、 b 分别为矩形光斑的半宽、半长; A 、 B 、 C 、 D 为光束整形因子分别为 100、1、1000、1; v 为清洗速度; t 为

清洗时间。

钢板及锈蚀层的 4 个对流边界为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_2(T - T_{\text{ini}}) \quad (8)$$

钢材底面边界视作绝热边界条件。当钢材继续升温进入气相阶段时,熔融液体在某一温度下气化的质量变化率^[24]为

$$v_m = \frac{dm}{dt} = \frac{P_0 \exp \left[-L_v/R \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_b} \right) \right]}{\sqrt{2\pi RT/M}} \quad (9)$$

式中: P_0 为标准大气压强; R 为气体普适常数; M 为金属摩尔质量; T_b 为靶材沸点,同时单位时间、单位面积液体表面因气化所损失的入射激光能量为

$$I_{\text{ev}} = L_v v_m \quad (10)$$

将式(10)代入式(4)中得到在相变过程中辐照面的边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha I - h(T - T_{\text{ini}}) - \varepsilon \sigma(T^4 - T_{\text{ini}}^4) - I_{\text{ev}} \quad (11)$$

3.2 高功率连续激光清洗模型的验证

设置清洗速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,激光功率为 3 kW,矩形光斑长 15 mm、宽 1 mm,时间为 0.1 s 时,激光清洗在锈蚀层表面以及钢材截面的温度云图如图 14 所示。

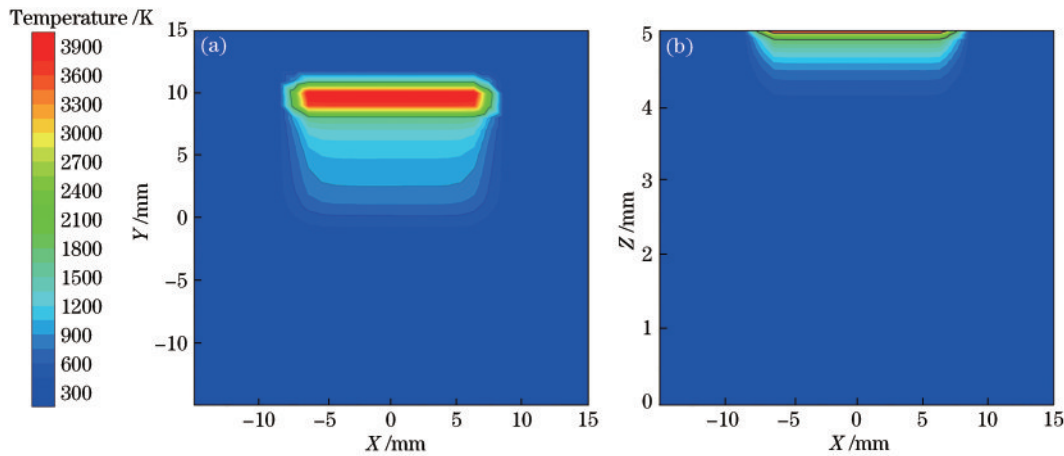


图 14 速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、功率为 3 kW 激光辐照 0.1 s 时的温度云图。(a) 正面; (b) 截面

Fig. 14 Temperature cloud map at a speed of $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ and a power of 3 kW when irradiated with a laser for 0.1 s. (a) Front; (b) cross-section

通过温度云图可以看到,在激光清洗过程中,光斑中心温度超过 3900 K,达到锈蚀层气化温度,即能够对锈蚀层进行清洗。温度云图在锈蚀层表面呈拖尾状分布,其截面呈梯形分布。速度恒定为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,将激光功率分别设置为 2、3、4、5、7 kW。并在锈蚀层表面以及锈蚀层与钢材界面 ($x=0, y=3 \text{ mm}, z=5 \text{ mm}$) 处设置温度探针,探针的温度变化如图 15 所示。由图 15(a) 可知, $t=0.02 \text{ s}$ 时钢材由于吸收激光能量,其温度急剧上升,锈蚀层会气化吸收一部分能量,靶材温度缓慢上升,激光辐照结束后温度在 0.06 s

内快速下降,且激光功率从 2 kW 至 7 kW 时,温度均高于锈蚀层表面温度,即能够对锈蚀层进行清洗。由图 15(b) 可知,激光功率 2 kW 及以下时,钢板与锈蚀层界面温度小于其气化温度为欠清洗阶段,与图 3(a) 一致,界面温度随激光功率提升而增加,当激光功率为 4 kW 时,其温度稍高于气化温度,即能够完全清洗锈蚀层符合图 3(c) 所示,当激光功率增加至 7 kW 时,其界面温度远高于钢板熔化温度,如实验结果图 3(e) 一样,表面波纹现象加剧。

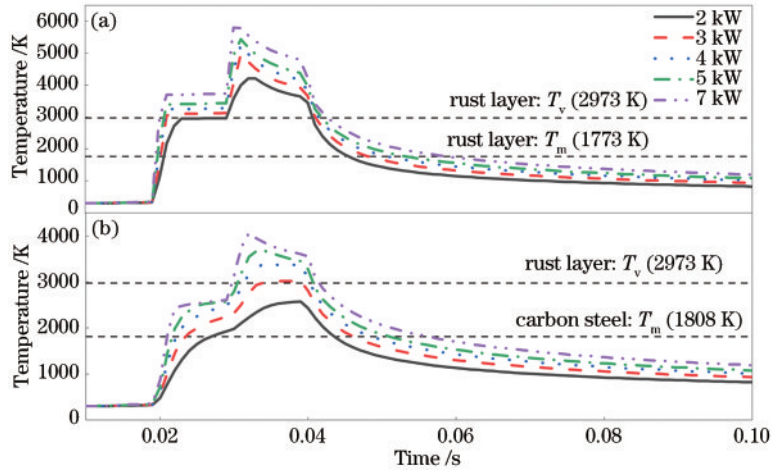


图 15 速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时不同功率下探针温度变化。(a) 正面; (b) 界面

Fig. 15 Probe temperature changes at different powers when speed is $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. (a) Front; (b) interface

将激光功率固定为 7 kW , 清洗速度分别设置为 100 、 200 、 300 、 400 、 $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 16 显示了在不同清洗速度下锈蚀层以及钢材表面的温度随时间的变化情况。由图 16(a) 可知, 不同速度的激光作用下能快速达到锈蚀层表面的气化温度, 但锈蚀层表面温度随速度增加无明显下降, 也即能够对锈蚀层进行清洗。由图 16(b) 可以看到, 交界面的温度随速度增加而急速下降, 当速度为 $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 其交界面的温度低

于锈蚀层汽化温度, 不能实现锈蚀层的清洗, 这是因为仿真中未考虑热膨胀机制。而在实际实验中, 当锈蚀层厚度较厚时, 由于锈蚀层导热性较差, 基体无法吸收激光, 锈蚀层主要依赖于气化烧蚀机制去除; 随着锈蚀层的去除, 当锈蚀层厚度较薄时, 基体吸收激光能量, 发生热膨胀机制以去除锈蚀^[25]。因此在实验中, 相同的参数条件下锈蚀层已完全清洗。

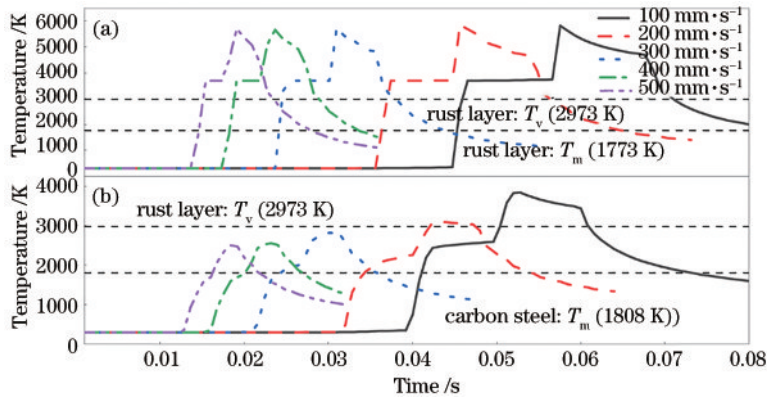


图 16 激光功率为 7 kW 时不同速度下探针温度变化。(a) 正面; (b) 界面

Fig. 16 Probe temperature changes at different speeds when laser power is 7 kW . (a) Front; (b) interface

在激光辐照中心建立一条直线 ($Z=0-5.05 \text{ mm}$) 测得线上温度变化随激光功率、速度变化如图 17(a)、17(c) 所示, 在直线上提取不同激光功率下温度到达熔点的深度, 并与实验结果作对比, 如图 17(b)、17(d) 所示。由 17(b) 可以看到, 重熔深度随激光功率增加而提升, 由图 17(d) 可以看到, 重熔深度随速度增加而呈下降趋势。重熔层深度在不同参数下的仿真结果与实验结果基本一致。

4 结 论

本文采用实验分析和物理仿真相结合的方式, 研究了不同工艺参数条件下连续激光对 Q235B 碳钢表

面锈蚀层的清洗效果, 分析了激光功率与清洗速度对清洗后表面形貌、重熔层、化学成分、硬度及电化学腐蚀性能的影响。主要结论如下:

- 1) 清洗速度恒定为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 设定激光功率在 $2-7 \text{ kW}$ 范围, 激光功率为 4 kW 时 O 含量最低 (质量分数为 15.50%), 此时能够完全清洗锈蚀层; 激光功率恒定为 7 kW , 设定速度在 $100-500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围, 基材表面的 O 含量先升高后降低, 速度为 $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, O 含量最低 (质量分数为 16.32%), 此时能够完全清洗锈蚀层, 其清洗效率达到 $20.6 \text{ m}^2/\text{h}$ 。
- 2) 激光清洗使基材表面形成重熔层, 使得清洗后的样品表面硬度增大, 并随重熔层深度的增加而增

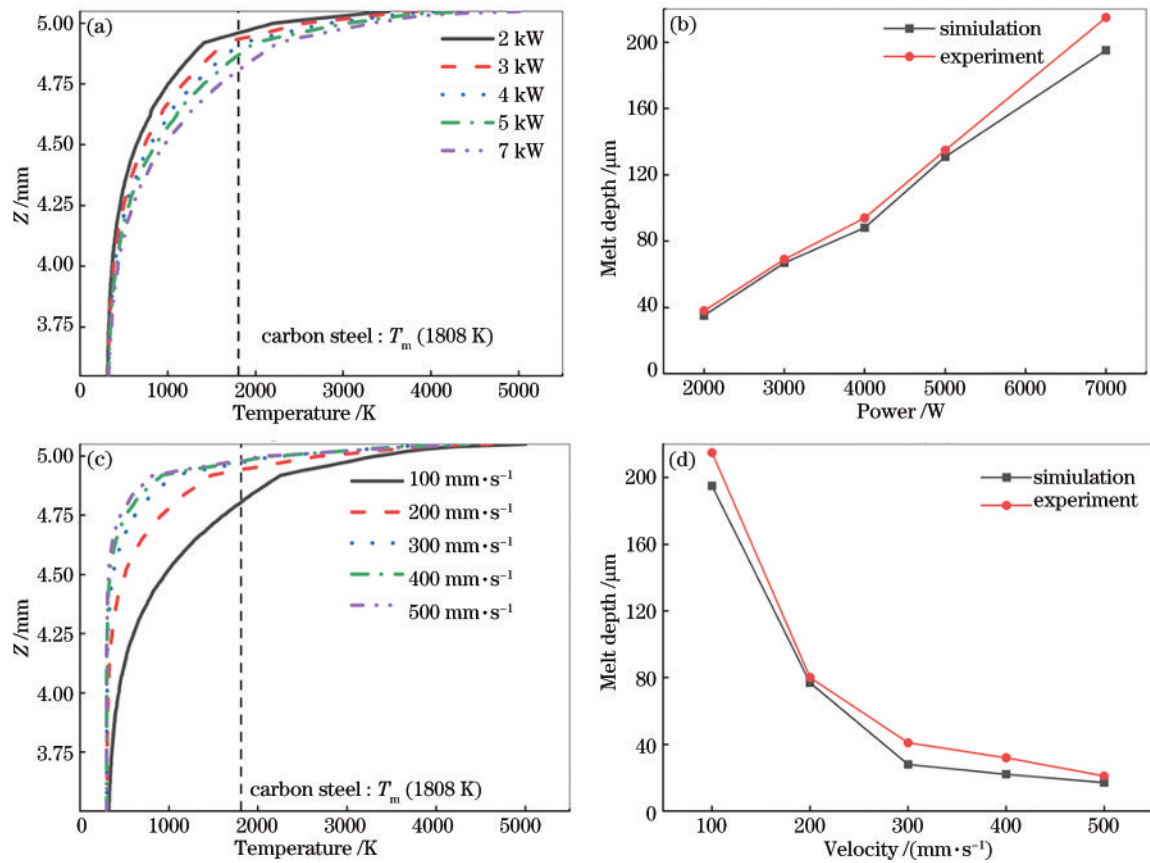


图 17 不同激光工艺参数下直线($Z=0-5.05$ mm)上温度曲线变化以及基材重熔深度仿真与实验对比。(a)、(b)速度恒为 $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的不同功率;(c)、(d)功率恒为 7 kW 下的不同速度

Fig. 17 Temperature curve changes on straight line ($Z=0-5.05$ mm) and simulation and experimental comparison of substrate remelting depth under different laser process parameters. (a), (b) Different powers at a constant speed of $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c), (d) different speeds at a constant power of 7 kW

大。当速度为 $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、激光功率为 7 kW 时,其表面硬度约为基材的 4 倍。

3) 连续激光清洗完锈蚀层后,其表面形成重熔层以及钢材表面的粗糙度减小使得材料表面的耐腐蚀性能提高。其完全清洗锈蚀阶段的抗腐蚀能力比欠清洗阶段的强,在激光功率为 7 kW 、清洗速度为 $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,由于其重熔深度更大,其抗腐蚀能力比完全清洗锈蚀层阶段的更高。

参 考 文 献

- [1] Guo S C, Si R Z, Dai Q L, et al. A critical review of corrosion development and rust removal techniques on the structural/environmental performance of corroded steel bridges[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 126-146.
- [2] 程一杰, 何飞德, 宋小宁, 等. 余热锅炉蒸发器腐蚀原因分析及化学清洗[J]. 工业水处理, 2018, 38(6): 102-105.
Cheng Y J, He F D, Song X N, et al. Cause analysis on the evaporator corrosion of waste heat boiler and chemical cleaning[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(6): 102-105.
- [3] Zhang G X, Hua X M, Huang Y, et al. Investigation on

mechanism of oxide removal and plasma behavior during laser cleaning on aluminum alloy[J]. Applied Surface Science, 2020, 506: 144666.

- [4] 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.
Wang K J. Study on pulsed laser derusting process of Q235 carbon steel[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [5] 廖大松, 汪倩, 王非森, 等. 纳秒脉冲激光清洗清洗速度对 TC4 钛合金表面氧化膜清洗质量的影响[J]. 中国激光, 2023, 50(4): 0402020.
Liao D S, Wang Q, Wang F S, et al. Effect of nanosecond pulsed laser cleaning scanning speed on surface oxide film cleaning quality of TC4 titanium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(4): 0402020.
- [6] 李鑫炎, 李灿阳, 王丹, 等. 激光清洗速度对 Q345 钢表面锈层清洗质量的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002010.
Li X Y, Li C Y, Wang D, et al. Effect of laser scanning speeds on cleaning quality of rusted layer on Q345 steel surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002010.
- [7] Guo L Y, Li Y Q, Geng S N, et al. Numerical and experimental analysis for morphology evolution of 6061

- aluminum alloy during nanosecond pulsed laser cleaning [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 432: 128056.
- [8] Sun Q, Zhou J Z, Meng X K, et al. Mechanism and threshold fluence of nanosecond pulsed laser paint removal[J]. *Rare Metals*, 2022, 41(3): 1022-1031.
- [9] Wei B X, Xu J, Gao L Q, et al. Nanosecond pulsed laser-assisted modified copper surface structure: enhanced surface microhardness and microbial corrosion resistance [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 107: 111-123.
- [10] Fujita K, Inagaki H, Toyosawa K, et al. kW-class laser cleaning for steel structure maintenance and decontamination [J]. *Journal of the Atomic Energy Society of Japan*, 2020, 62(5): 259-262.
- [11] Zhuang S S, Kainuma S, Yang M Y, et al. Investigation on the peak temperature and surface defects on the carbon steel treated by rotating CW laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106727.
- [12] Zhuang S S, Kainuma S, Yang M Y, et al. Characterizing corrosion properties of carbon steel affected by high-power laser cleaning[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 274: 122085.
- [13] Anthony T R, Cline H E. Surface rippling induced by surface-tension gradients during laser surface melting and alloying[J]. *Journal of Applied Physics*, 1977, 48(9): 3888-3894.
- [14] Kim W S, Sim B C. Study of thermal behavior and fluid flow during laser surface heating of alloys[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 1997, 31(7): 703-723.
- [15] Sim B C, Kim W S. Melting and dynamic-surface deformation in laser surface heating[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(6): 1137-1144.
- [16] Wang Q D, Kainuma S, Zhuang S S, et al. Laser cleaning on severely corroded steel members: engineering attempt and cleanliness assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376: 134224.
- [17] Duprat F, Larrard T, Vu N T. Quantification of Tafel coefficients according to passive/active state of steel carbonation-induced corrosion in concrete[J]. *Materials and Corrosion*, 2019, 70(11): 1934-1963.
- [18] Evans S, Koehler E L. Use of polarization methods in the determination of the rate of corrosion of aluminum alloys in anaerobic media[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1961, 108(6): 509.
- [19] Guo L, Gao Y, Cheng Y X, et al. Microstructure design of the laser glazed layer on thermal barrier coatings and its effect on the CMAS corrosion[J]. *Corrosion Science*, 2021, 192: 109847.
- [20] 孙宝龙. 低碳合金钢在 NaCl 溶液作用下的电化学腐蚀特征[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2013.
Sun B L. Electrochemical corrosion characteristics of low-carbon alloy steel in NaCl solution[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2013.
- [21] 廖聪豪, 周静, 沈洪. 增材制造 TC4 钛合金在激光抛光前后的电化学腐蚀性能[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0102003.
Liao C H, Zhou J, Shen H. Electrochemical corrosion behaviors before and after laser polishing of additive manufactured TC4 titanium alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0102003.
- [22] 查榕威. 纳秒脉冲激光清洗锈蚀层的机理与工艺研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.
Zha R W. Study on mechanism and process of cleaning rust layer with nanosecond pulse laser[D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [23] Xiao M, Gao C K, Tan C W, et al. Experimental and numerical assessment of interfacial microstructure evolution in dissimilar Al/steel joint by diode laser welding-brazing [J]. *Optik*, 2021, 245: 167706.
- [24] 陆建. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 48-48.
Lu J. Physics of laser interaction with materials[M]. Beijing: China Machine Press, 1996: 48-48.
- [25] 王欢, 蒿诗洁, 刘丽飒, 等. LD 泵浦声光调 Q Nd:YAG 激光扫描除锈机制[J]. *清洗世界*, 2018, 34(5): 37-41.
Wang H, Man S J, Liu L S, et al. Mechanism of derusting by laser-diode pumped acousto-optic Q-switch Nd:YAG laser[J]. *Cleaning World*, 2018, 34(5): 37-41.