

激光与光电子学进展

基于 COMSOL 千瓦级激光清洗 45 钢锈层工艺研究

杨乐^{1,2,3}, 宁利川^{1,2,3*}, 刘金波^{1,2,3,4}, 杨金堂^{1,2,3}¹冶金装备及其控制教育部重点实验室 (武汉科技大学), 湖北 武汉 430081;²机械传动与制造工程湖北省重点实验室 (武汉科技大学), 湖北 武汉 430081;³武汉科技大学精密制造研究院, 湖北 武汉 430081;⁴广东中南钢铁股份有限公司, 广东 韶关 512123

摘要 利用 COMSOL Multiphysics 软件模拟 1064 nm 波长、20~100 kHz 重复频率、1000 W 的大功率移动激光清洗实验平台,对激光清洗过程进行可视化分析,研究峰值功率密度和清洗速度对污染层和基底温度场及烧蚀形貌变化的影响规律。此外,利用扫描电子显微镜和粗糙度仪对不同峰值功率密度和搭接率下的激光清洗效果进行实验验证。结果表明:随激光清洗时间的增加,烧蚀过程锈层温度变化接近高斯变化趋势;激光清洗 45 钢理论清洗阈值为 1.9×10^7 W/cm²,理论损伤阈值为 10.0×10^7 W/cm²;阈值范围内,峰值功率密度越大,清洗速度适当降低,清洗效果和效率越佳;当峰值功率密度为 6.0×10^7 W/cm²、清洗速度为 300 mm/s、对应搭接率为 70% 时,清洗效果最佳。这些结果对于指导工业参数化 kW 级激光清洗实验意义重大。

关键词 COMSOL; 激光清洗; 功率密度; 搭接率; SEM; 表面粗糙度

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231085

Process of Cleaning 45 Steel Rust Layer Based on COMSOL Kilowatt Laser

Yang Le^{1,2,3}, Ning Lichuan^{1,2,3*}, Liu Jinbo^{1,2,3,4}, Yang Jintang^{1,2,3}¹Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control of Ministry of Education
(Wuhan University of Science and Technology), Hubei 430081, Wuhan, China;²Hubei Provincial Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering
(Wuhan University of Science and Technology), Hubei 430081, Wuhan, China;³Precision Manufacturing Research Institute, Wuhan University of Science and Technology,
Hubei 430081, Wuhan, China;⁴Guangdong Zhongnan Iron & Steel Co., Ltd., Shaoguan 512123, Guangdong, China

Abstract By using COMSOL Multiphysics software to simulate a high-power mobile laser cleaning experimental platform with wavelength of 1064 nm, repetition rate of 20–100 kHz and power of 1000 W, visualized analysis of the laser cleaning process is carried out. The effects of the peak power density and cleaning speed on the changes of the temperature field and erosion morphology of the pollutant layer and substrate are investigated. To validate the findings, scanning electron microscope and roughness testers are utilized to study the laser cleaning effects under different peak power densities and overlapping ratios. The results show that with the increase of the laser cleaning time, the temperature variation during the laser cleaning process on the rust layer followed Gaussian distribution. The theoretical cleaning threshold and damage threshold for cleaning 45-grade steel found to be 1.9×10^7 W/cm² and 10.0×10^7 W/cm², respectively. Within these thresholds, the cleaning efficiency and the cleaning effect improved with an appropriate reduction of the cleaning speed as the peak power density increased. The best cleaning effect achieved with peak power density of 6.0×10^7 W/cm², cleaning speed of 300 mm/s and corresponding overlap ratio of 70%. These findings are significant for enabling the industrial parameterization of kilowatt-level laser cleaning experiments.

Key words COMSOL; laser cleaning; power density; lap rate; SEM; surface roughness

收稿日期: 2023-04-14; 修回日期: 2023-05-03; 录用日期: 2023-05-26; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家重点专项资助项目(2018YFC1902400)、国家自然科学基金(51805386)

通信作者: *403366762@qq.com

1 引言

激光清洗是一种新型高效环保的绿色清洗技术,与传统清洗加工工艺相比,它具有无接触、无污染、无噪声、无耗材的特点,在钢材表面除锈领域有极大的应用前景^[1-4]。近些年船舶、航空航天、机械设备、桥梁建设等工业领域对钢材除锈效率提出了更高的要求,大功率激光参数化清洗相比常规功率激光器清洗,在清洗效率、质量以及适用性等方面,无疑更具优势,因此对大功率激光参数化清洗的研究势在必行。

目前针对激光除锈工艺参数的影响,国内外学者开展了大量相关的有限元分析和研究。Ali等^[5]比较了1064 nm和532 nm激光器在去除低碳钢表面锈蚀时其粗糙度和硬度等性能的变化。Chan等^[6]结合极化曲线和Minitab数据分析,得出了激光功率、重复频率等参数对抗腐蚀性能的影响规律。刘彩飞等^[7]建立了有限元模型,研究了脉冲激光去除金属表面漆膜的过程,模拟了喷有漆膜的不锈钢样品表面在激光清洗下的温度场。闫晓东等^[8]利用COMSOL Multiphysics建立纳秒激光烧蚀模型,讨论了扫描速度对烧蚀深度的影响。高辽远等^[9]在COMSOL中模拟高斯脉冲光源对2024铝合金表面丙烯酸聚酯氨漆层进行清洗,研究激光能量密度以及扫描速度对清洗温度场和清洗深度的影响,并通过实验进行了验证。邱兆彪等^[10]全面探究了多种工艺参数对锈蚀氧化物去除效果的影响。谭东晖等^[11-12]利用有限元方法分析了激光清洗过程中基片表面的温度分布,推导出了硅片表面油脂的清洗阈值和损伤阈值。孙兴伟等^[13]通过正交实验法进行石油管螺纹激光清洗实验,以表面粗糙度值为指标,探究了激光功率、离焦量、扫描速度等工艺参数对石油管螺纹激光除锈效果的影响规律并获得了最优工艺参数组合。王春生等^[14]研究了不同功率下漆膜的去除状况,

并通过图像处理特征值的方法对清洗状态进行判定,为高强钢表面漆层的去除提供了实用的工艺参数及检测方法。廖大松等^[15]利用纳秒脉冲激光器对TC4钛合金表面的氧化膜及油污进行激光清洗,研究了扫描速度对清洗后试样的表面形貌、成分、元素含量、价态及表面粗糙度、硬度和耐腐蚀等性能的影响规律。刘伟军等^[16]利用脉冲光纤激光器对TC4钛合金表面的环氧锌黄漆层进行了激光清洗实验,研究了激光能量密度和激光清洗速度对清洗效果的影响规律,分析了试样清洗后的表面形貌、表面粗糙度以及物相组成,并测量了清洗后基材表面的维氏硬度。

上述研究多模拟kW级脉冲激光参数对清洗后表面形貌的影响,但并没有详细说明清洗过程中工件内部状态、基底和锈层表面及内部温度、形貌及搭接率的变化过程。因此,为了提高工件清洗质量,保证工件的二次使用,本文对大功率移动纳秒激光清洗45钢表面锈层过程进行系统分析。通过COMSOL仿真软件建立有限元模型,可视化地研究激光清洗过程,分析不同工艺参数对烧蚀深度、温度、搭接率变化的影响规律,并通过扫描电子显微镜(SEM)和表面粗糙度仪对仿真数据进行实验验证,为kW级激光清洗45钢锈层提供了理论与实验基础。

2 数值模拟

2.1 激光清洗模型的建立

污染物主要通过范德华力、毛细力和静电力等附着在物体表面。激光除锈将窄脉宽、高功率密度的激光作用于待清洗物表面,在快速光振动、气化、分解和等离子体剥离等机理的共同作用下,克服上述几种力对表面微粒的吸附作用,使得污染物微粒脱离基底,实现表面清洗^[17-19]。模拟时只考虑固体吸热气化,忽略其他剥离机制,激光除锈作用机理如图1所示。

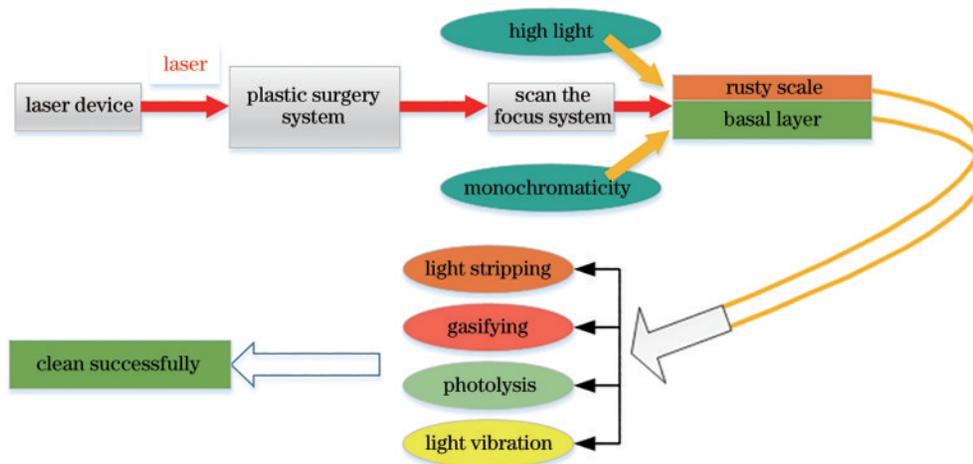


图1 激光除锈作用机理

Fig. 1 Mechanism of laser rust removal

COMSOL 软件包含固体传热和变形几何模块,集线性和非线性结构分析、流体分析、瞬态温度分析、多位移耦合分析等于一体,适用于激光清洗过程模拟。

定义尺寸为 $12000\ \mu\text{m} \times 5000\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ 的各层联合基体的上层为污染层 (Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 混合物),下层为基体 (45 钢)。由于锈层受热变形程度较大,网格细化为 $50\ \mu\text{m}$,基体为常规网格。上表面定义为自由变形,指明烧蚀网格变形速度 (法向热通量和边界对流热通量),相邻两层材料为完全热传导,无能量损失。激光清洗网格模型如图 2 所示。

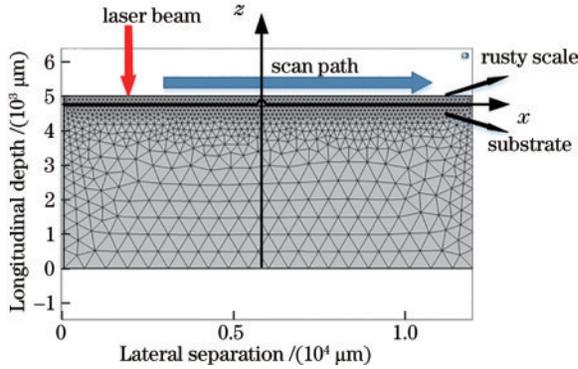


图 2 激光清洗网格模型

Fig. 2 Laser cleaning grid model

脉冲激光峰值功率密度在平均功率密度的基础上除以激光单脉冲脉宽,是脉冲激光器所能达到的最高功率密度,其计算公式为

$$F = \frac{P}{\pi R^2 f \tau}, \quad (1)$$

式中: P 为激光器输入总功率; f 为激光重复频率; τ 为激光单脉冲宽度; R 为激光光斑半径。

以图 2 激光清洗网格模型建立坐标系,以 $z=0$ 处为锈层和基底层接触面,表面锈层厚度为 L_r ,基底层的厚度为 L_s ,清洗方向为 x ,入射激光能量密度为 I_0 。清洗时,由于脉冲激光功率密度受到时间和空间限制被削弱,其能量会以高斯分布的形式呈现。高斯分布能量密度^[20]为

$$I(x, t) = I_0 s(x) g(t) = I_0 \exp\left(-\frac{x^2}{x_0^2}\right) \frac{t}{\tau_0^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (2)$$

式中: $s(x)$ 、 $g(t)$ 分别为 x 和 t 的高斯空间和时间分布函数; t 为激光作用时间; τ 为激光单脉冲宽度。

高斯脉冲激光作为热源,其能量由锈层和基底各吸收一部分。根据朗伯-比尔定律 (Lambert-Beerlaw) 即物质对光的吸收定律,各层中吸收的光强为

$$-k_m \frac{\partial}{\partial z} T_m(x, z, t) = A_m(T) I_0 s(x) g(t) \exp(-\alpha z), \quad (3)$$

式中: T_m 为各层吸收的光强; k_m 为各层材料的热导系数; $A_m(T)$ 为各层材料的吸收率;下角标 m 为基底;参

数 α 为各层材料的吸收系数。

激光被吸收后引起了热效应,其作用过程视为热传导作用过程:

$$\rho_r c_r \frac{\partial T(x, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial r} \left[x k_r \frac{\partial T(x, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_r \frac{\partial T(x, z, t)}{\partial z} \right], \quad (4)$$

式中: ρ_r 、 c_r 、 k_r 分别代表锈层的密度、热容和热传导系数; z 的取值范围为 $0 \sim L_r$ 。激光照射可作为表面热源,因此表面锈层上表面边界条件为

$$-k_r \frac{\partial}{\partial z} T_r(x, L_r, t) = A_r(T) I_0 s(x) g(t) \exp(-\alpha L_r), \quad (5)$$

式中, α 为锈层的能量吸收系数。在初始状态 ($t=0$) 时,锈层温度与环境温度相同,即:

$$T_r(x, z, 0) = T_0, \quad (6)$$

式中, T_0 为环境温度,故 $T_0 = 293\ \text{K}$ 。因此经过锈层时激光的功率密度为

$$I(x, 0, t) = (1 - k_r) I(x, z, t) A_r I_0 s(x) g(t) \exp(-\alpha L_r), \quad (7)$$

式中: k_r 为锈层表面对激光的反射率; A_r 为锈层对激光的吸收率。

2.2 清洗过程演变

2.2.1 温度场的演变

激光清洗是高功率密度的激光束与污染层的相互作用。材料吸收能量产生温升,并以热传导的方式向内部传播,影响其组织和性能。但激光清洗的凹坑直径较小,且靶材温度极高,无法被直接测量。因此,在烧蚀表面插入温度指针,以研究激光烧蚀温度场的演变过程。

图 3 展示了当激光功率 (P) 为 $1000\ \text{W}$ 、光斑直径 (D) 为 $800\ \mu\text{m}$ 、清洗速度 (V) 为 0 时,污染层的温度场演变过程。在激光清洗时间 $10 \sim 30\ \text{ms}$ 范围内,污染层温度逐渐升高,最高温度由 $2450\ \text{K}$ 升高为 $3240\ \text{K}$;在激光清洗时间 $40 \sim 60\ \text{ms}$ 范围内,靶材最高温度保持不变,为 $3220\ \text{K}$ 。分析认为:当温度达到锈层的熔点 ($1843\ \text{K}$) 时,材料熔化;当温度继续升高至 $3123\ \text{K}$ 时,达到材料的气化温度,温度不再升高。

图 4 展示了当激光功率为 $1000\ \text{W}$ 、光斑直径为 $800\ \mu\text{m}$ 、清洗速度为 0 时,锈层表面横向和纵向温度场的演变过程。横向温度关于热源中心对称,中心温度最高,近似于高斯的激光能量分布,且随激光作用时间的增加,中心温度不断升高,由 $293\ \text{K}$ 升高到 $3300\ \text{K}$ 左右。锈层温度上升速度先增大后减小,上升速度最大时是激光清洗的 $30 \sim 40\ \text{ms}$,为 $132.5\ \text{K/ms}$ 。相同深度不同时刻的横向温度随着激光清洗时间的增加而升高;纵向锈层温度沿深度方向不断下降,由 $3300\ \text{K}$ 降至室温,距离清洗中心 $200 \sim 300\ \mu\text{m}$ 处降低速率最大,

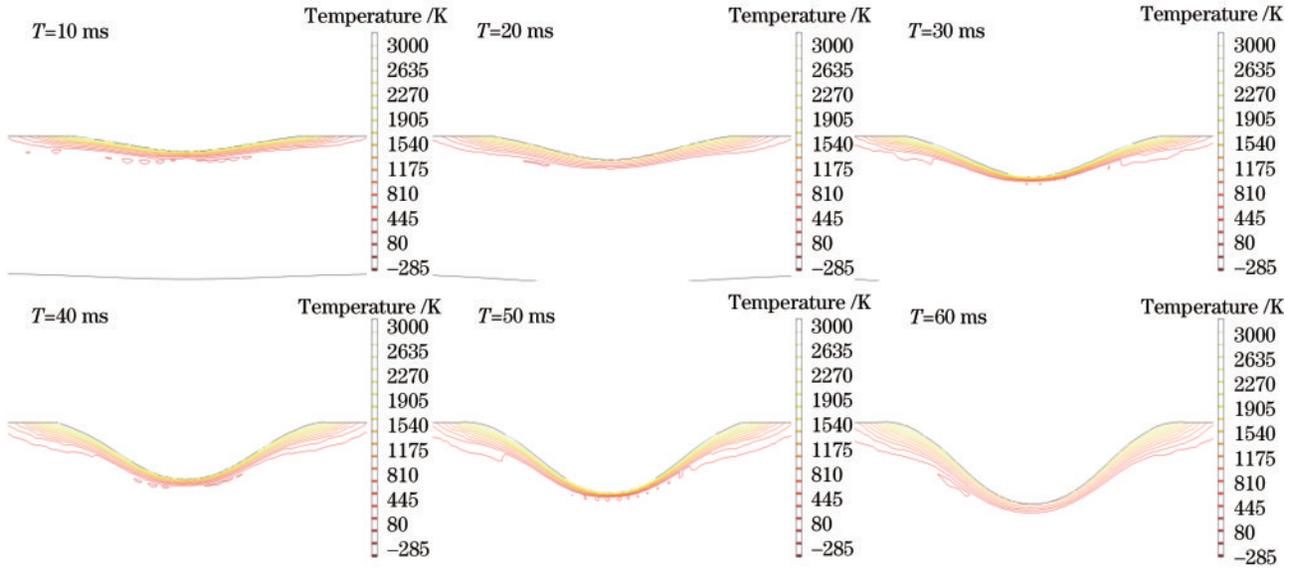


图 3 激光清洗温度场及等温线演变 ($P=1000\text{ W}$ 、 $D=800\text{ }\mu\text{m}$ 、 $V=0$)

Fig. 3 Evolution of laser cleaning temperature field and isotherm during laser cleaning ($P=1000\text{ W}$, $D=800\text{ }\mu\text{m}$, $V=0$)

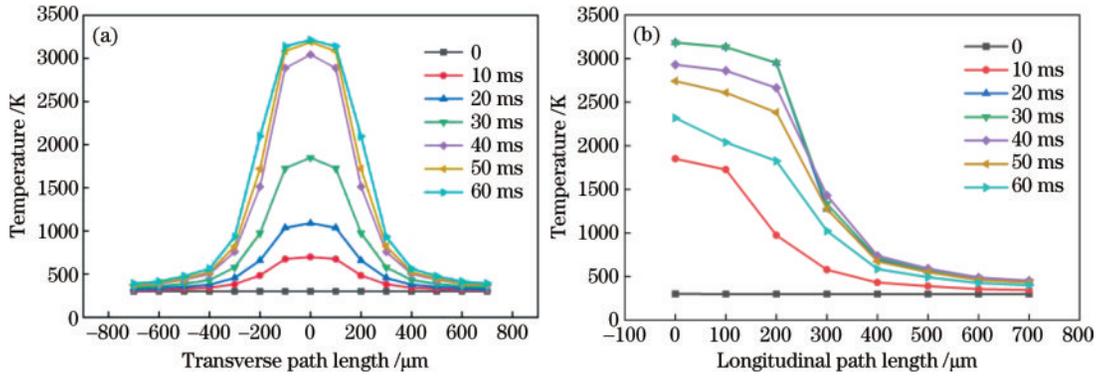


图 4 激光清洗横向和纵向温度场变化

Fig. 4 Transverse and longitudinal temperature field changes during laser cleaning

为 145.3 K/ms 。同一时刻随清洗深度的增加,温度不断降低;同一清洗深度,随时间推进,温度不断降低。最终当深度达到约 $550\text{ }\mu\text{m}$ 时,温度趋于室温,并开始维持稳定。相同宽度不同时刻的纵向温度随着激光清洗时间的增加而增加。

激光清洗温度场和等温线演变说明了:在不考虑材料受热产生的膨胀热应力除锈机理,只考虑激光高温烧蚀除锈机理的前提下,温度升高至锈层气化温度是烧蚀形貌变化的直接原因,温度升高越快,形貌变化越快;随烧蚀深度和宽度的增大,集中于一点的激光能量将不断被消耗,温度趋于室温,形貌变化停止。

2.2.2 清洗深度和宽度的演变

当激光作用于污染层,锈层表面开始被烧蚀,熔体向外喷溅、烧蚀和升华,表面形貌开始发生变化。随着清洗的进行,现有器材很难直接测量烧蚀深度和宽度的变化。在烧蚀表面插入位移深度和宽度指针,以研究激光烧蚀深度和宽度的模拟演变过程。

图 5 展示了当激光功率为 1000 W 、光斑直径为

$800\text{ }\mu\text{m}$ 、清洗速度为 0 时,污染层的表面形貌演变过程。随着清洗的进行(清洗时间从 $T=0$ 到 $T=50\text{ ms}$),清洗深度持续加深,宽度也不断增大,当 $T=60\text{ ms}$ 时,深度还在增大,而宽度达到最大值 ($842.3\text{ }\mu\text{m}$)。分析认为:由于清洗速度为 0 ,清洗区域为光斑互相搭接连成的清洗槽,随着激光的持续作用,能量在纵向被持续积攒消耗,锈层深度被持续烧蚀,平均增速为 $3.48\text{ }\mu\text{m/ms}$;而横向由于没有能量的累积,宽度没有持续增大,平均增速为 $16\text{ }\mu\text{m/ms}$ 。此外,当烧蚀宽度介于光斑直径范围内时,激光横向能量更加集中,横向烧蚀速度快。而当烧蚀宽度开始达到光斑直径时,宽度增加变缓,开始保持恒定;激光纵向能量更为集中,引发了纵向烧蚀深度的变化。

2.3 激光峰值功率密度对激光除锈的影响

激光峰值功率密度反映了单位面积锈层接收能量的大小,它直接影响了基底和锈层温度场和清洗深度的变化。图 6 展示了当扫描速度为 300 mm/s (搭接率为 70%)、光斑直径为 $800\text{ }\mu\text{m}$ 时,不同峰值功率密度的激光作用于锈层表面的烧蚀温度和深度的演变过程。

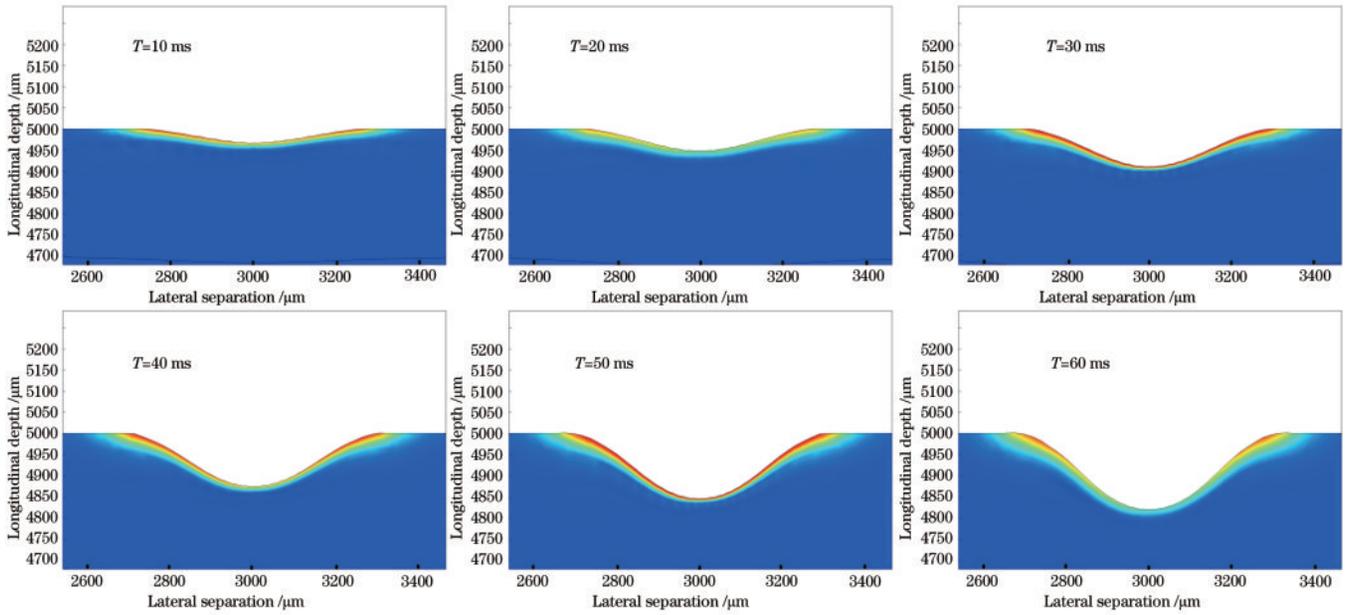


图 5 激光清洗深度及宽度的演变 ($P=1000\text{ W}$, $D=400\text{ }\mu\text{m}$, $V=0$)

Fig. 5 Evolution of the depth and width during laser cleaning ($P=1000\text{ W}$, $D=400\text{ }\mu\text{m}$, $V=0$)

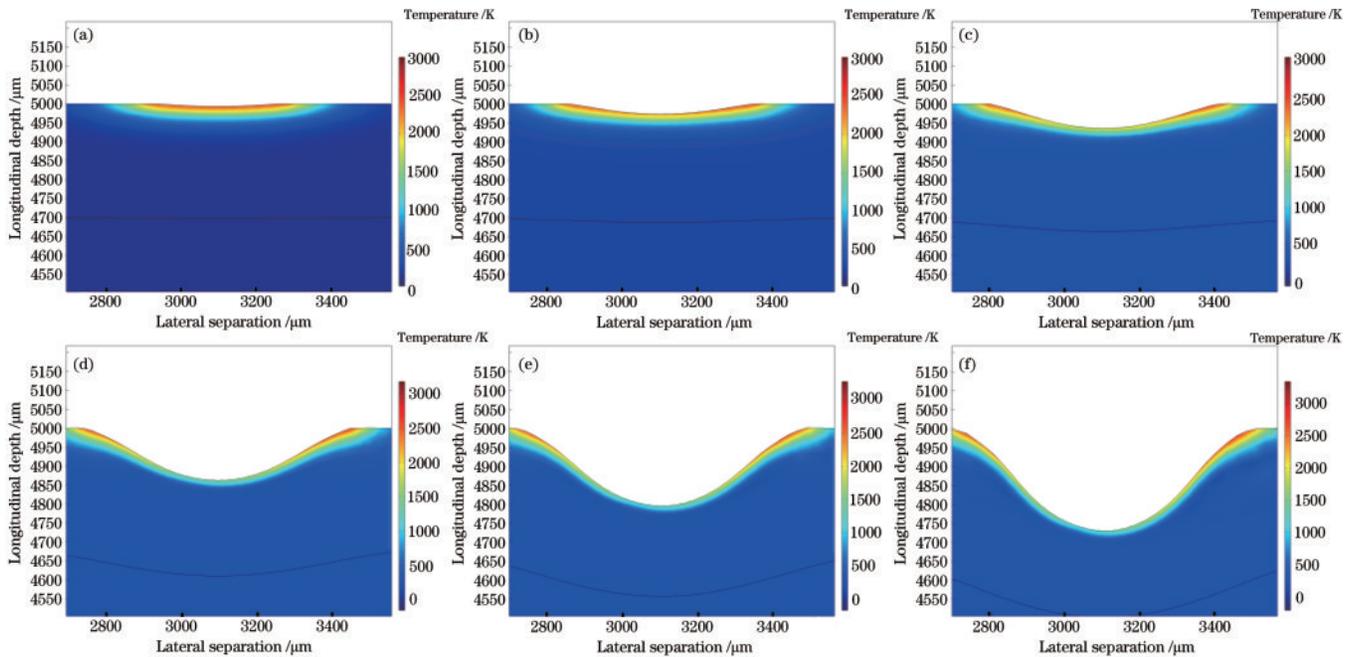


图 6 不同峰值功率密度下的清洗演变过程。(a) $1.99 \times 10^6\text{ W/cm}^2$; (b) $9.95 \times 10^6\text{ W/cm}^2$; (c) $1.39 \times 10^7\text{ W/cm}^2$; (d) $1.79 \times 10^7\text{ W/cm}^2$; (e) $5.97 \times 10^7\text{ W/cm}^2$; (f) $1.59 \times 10^8\text{ W/cm}^2$

Fig. 6 Cleaning evolution process at different peak power densities. (a) $1.99 \times 10^6\text{ W/cm}^2$; (b) $9.95 \times 10^6\text{ W/cm}^2$; (c) $1.39 \times 10^7\text{ W/cm}^2$; (d) $1.79 \times 10^7\text{ W/cm}^2$; (e) $5.97 \times 10^7\text{ W/cm}^2$; (f) $1.59 \times 10^8\text{ W/cm}^2$

随峰值功率密度的增大,烧蚀深度明显加大,当功率密度为 $1.59 \times 10^8\text{ W/cm}^2$ 时,锈层烧蚀深度达到最大 ($290\text{ }\mu\text{m}$),烧蚀表面温度最高可达 3100 K 。不同峰值功率密度的清洗演变过程说明了在不考虑材料受热产生的膨胀热应力除锈机理,只考虑激光高温烧蚀除锈机理的前提下,固定激光清洗速度,烧蚀深度的变化和峰值功率密度的变化呈正相关,随峰值功率密度的增大,烧蚀深度方向能量不断积累,达到锈层材料气化温

度,锈层不断被烧蚀,深度不断增加。

图 7 为不同功率密度下锈层和基底层清洗温度和深度的变化曲线。锈层和基体表面温度均随着峰值功率密度的增大而升高。峰值功率密度为 $0 \sim 3.0 \times 10^7\text{ W/cm}^2$ 时,锈层温度增长速度最快,越过熔化温度直达气化温度,最高可达 3250 K ;而基层温度上升相对较缓,在峰值功率密度为 $10.0 \times 10^7\text{ W/cm}^2$ 时达到融化温度,开始受到激光热影响被损坏。分析认为:当峰值

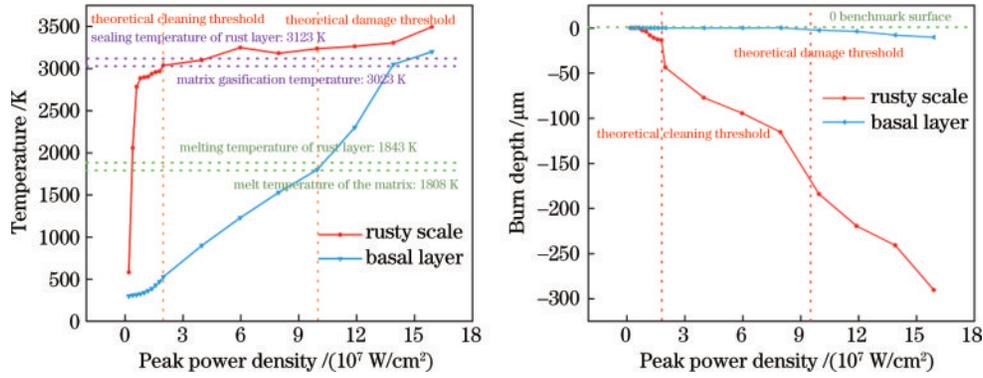


图7 不同峰值功率密度下的温度和深度变化

Fig. 7 Temperature and depth variations at different peak power densities

功率密度为 $1.9 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,锈层表面温度达到了锈层的气化温度,此时为锈层的理论清洗阈值;当峰值功率密度为 $10.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,基体表面温度达到了基体的热融化温度,此时为基体的理论损伤阈值。

锈层清洗深度随峰值功率密度的增大而不断加深,基体没有明显变化。当峰值功率密度为 $0 \sim 1.9 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,锈层深度基本没有变化;当峰值功率密度为 $1.9 \times 10^7 \sim 2.5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,加深速度最快。基体在峰值功率密度为 $0 \sim 10.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时没有深度变化,在 $10.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 之后开始有深度的增加。分析认为:当峰值功率密度为 $1.9 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时才开始有烧蚀深度变化,此时为锈层理论清洗阈值;当峰值功率密度为 $10.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,基体才开始有损伤,此时为基体的理论损伤阈值。图7中不同峰值功率密度下锈层、基底温度和烧蚀深度变化的清洗阈值和损伤阈值相对应,佐证了模型的准确性。

2.4 激光移动速度对激光除锈的影响

扫描速度的大小直接决定了激光光斑搭接率的大小。搭接率主要指激光光斑移动方向相邻两光斑的重叠率,扫描速度越快,搭接率越小;反之则越大。图8为激光光斑之间的搭接示意图,其中: L 为清洗总长度; l 为相邻两光斑的搭接长度。

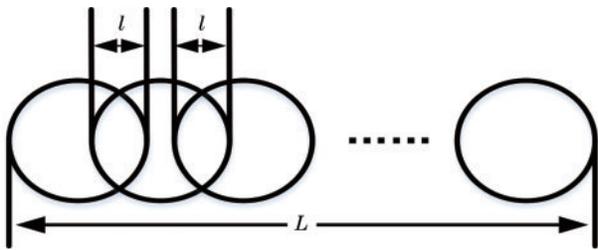


图8 激光光斑搭接示意图

Fig. 8 Schematic diagram of laser spot lap

2.4.1 对搭接形貌的影响

图9展示了当峰值功率密度为 $6.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,不同扫描速度下(不同搭接率)激光作用于锈层表面烧蚀温度和烧蚀深度以及表面搭接形貌的演变过程。如图9(a)所示,当扫描速度为 300 mm/s (对应搭接

率为70%)时,搭接中心未出现残留。如图9(b)~(f)所示,随着扫描速度的增大,对应搭接率不断减小,搭接中心残留不断增大,当速度达到 1200 mm/s 时,搭接率为0,出现两光斑搭接中心未烧蚀的现象。说明:扫描速度的大小和搭接率的变化呈负相关,扫描速度越大,搭接率越小,搭接中心烧蚀残留越多,搭接效果越差。当峰值功率密度为 $6.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 、扫描速度为 300 mm/s 、对应搭接率为70%时,相邻两光斑之间搭接平滑,搭接中心未出现烧蚀残留,此时的搭接率为最佳搭接率。

2.4.2 对基底和锈层温度场和清洗深度的影响

图10为不同扫描速度下锈层和基底层清洗温度和深度的变化曲线。锈层和基体表面温度均随着扫描速度的增大而降低。当扫描速度为 $650 \sim 750 \text{ mm/s}$ 时,锈层温度下降速度最快;而基体表面温度下降幅度小,基本保持稳定。分析认为:随着扫描速度的增大,激光能量分布不再集中,温度相对有所下降。

锈层清洗深度随扫描速度的增大而不断减小,基体没有明显变化。当扫描速度为 $430 \sim 530 \text{ mm/s}$ 时,锈层深度减小速度最快。基体只在 $0 \sim 530 \text{ mm/s}$ 扫描速度范围内有轻微深度增大,之后一直保持稳定。分析认为:随扫描速度增大,单位面积内接收的能量减少,单次扫描深度有所降低。而基体开始受热会发生热胀冷缩,故基体会出现负增长。

3 实验验证

3.1 实验材料与方法

本实验采用 JZ-1000W 型脉冲激光器,其波长为 1064 nm ,最大输出功率为 1000 W 。激光清洗时,由激光器产生的光束经光纤传输后,光斑形成了尺寸为 $100 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 的矩形光槽,可通过调节激光器输出功率实现对峰值功率密度的调节。为保证清洗过程速度稳定,通过 fanuc 六轴机器人及其控制系统带动激光清洗口移动来调节速度。系统控制组件包括制冷单元、激光器、清洗加工头、空气清扫单元、除尘净化单元。

设计两水平因素复合正交实验,对峰值功率密度

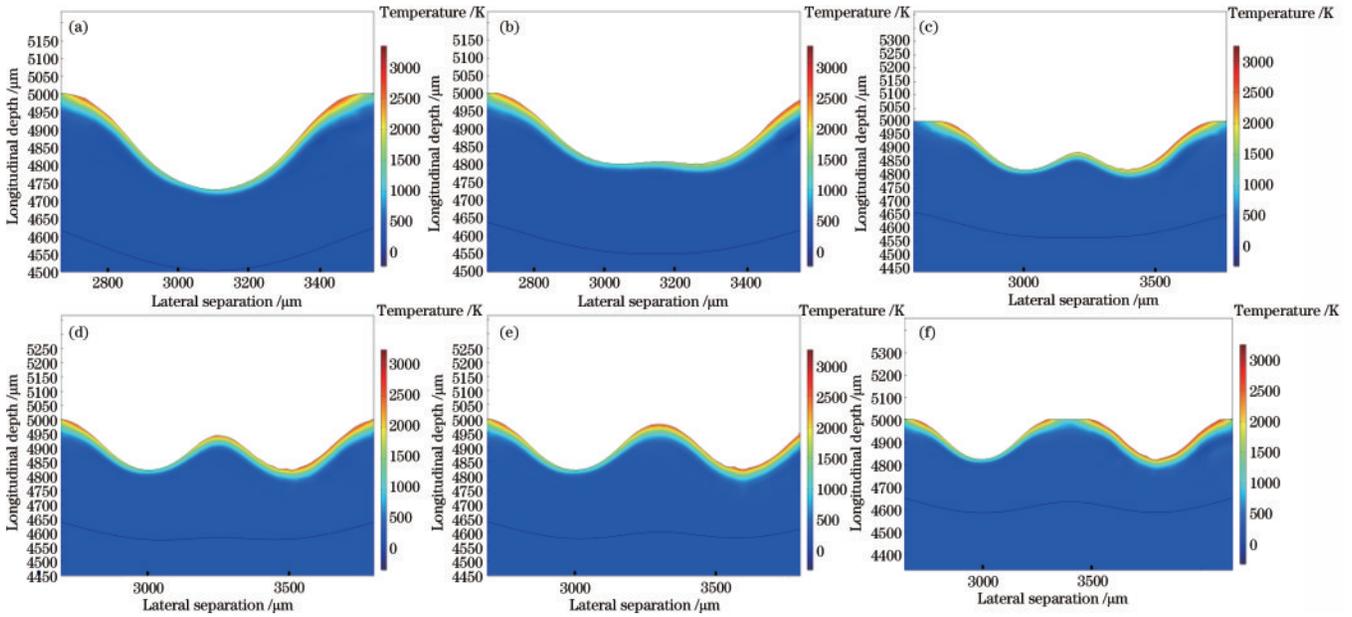


图 9 不同扫描速度下烧蚀温度深度及搭接形貌变化。(a)300 mm/s; (b)500 mm/s; (c)700 mm/s; (d)900 mm/s; (e)1100 mm/s; (f)1300 mm/s

Fig. 9 Ablation temperature depths and lap morphology changes at different scanning speeds. (a) 300 mm/s; (b) 500 mm/s; (c) 700 mm/s; (d) 900 mm/s; (e) 1100 mm/s; (f) 1300 mm/s

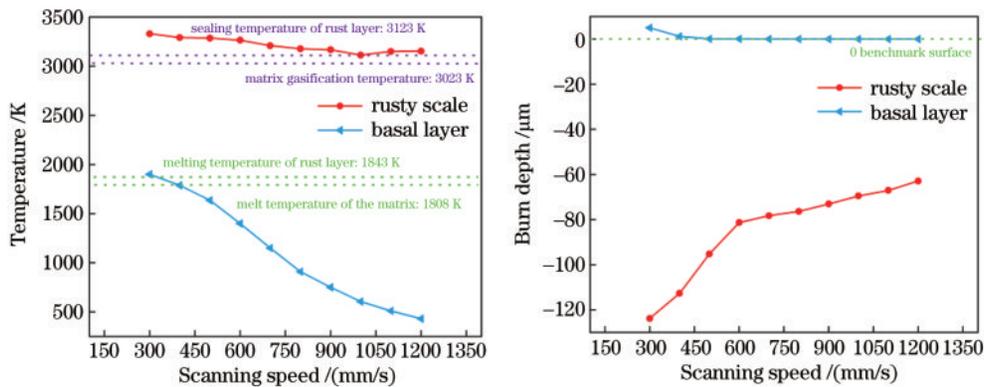


图 10 不同激光扫描速度下温度和深度的变化

Fig. 10 Temperature and depth changes at different laser scanning speeds

和清洗速度对激光清洗的影响进行实验研究,并通过 SEM 和表面粗糙度仪对清洗效果进行验证。激光清

洗机及参数如表 1 所示,现场激光清洗实验装置及清洗前后衬板效果如图 11 所示。

表 1 JZ-1000W 型脉冲激光器主要参数

Table 1 Main parameters of the JZ-1000W pulsed laser

Parameter	Value
Laser type	Pulse
Laser wavelength /nm	1064
Power regulation range /W	100-1000
Single pulse width /ns	300
Laser repetition frequency /kHz	10
Laser scanning speed /(mm/s)	Adjustable
Laser spot diameter /mm	0.8
Operating distance /mm	150/200/250/300



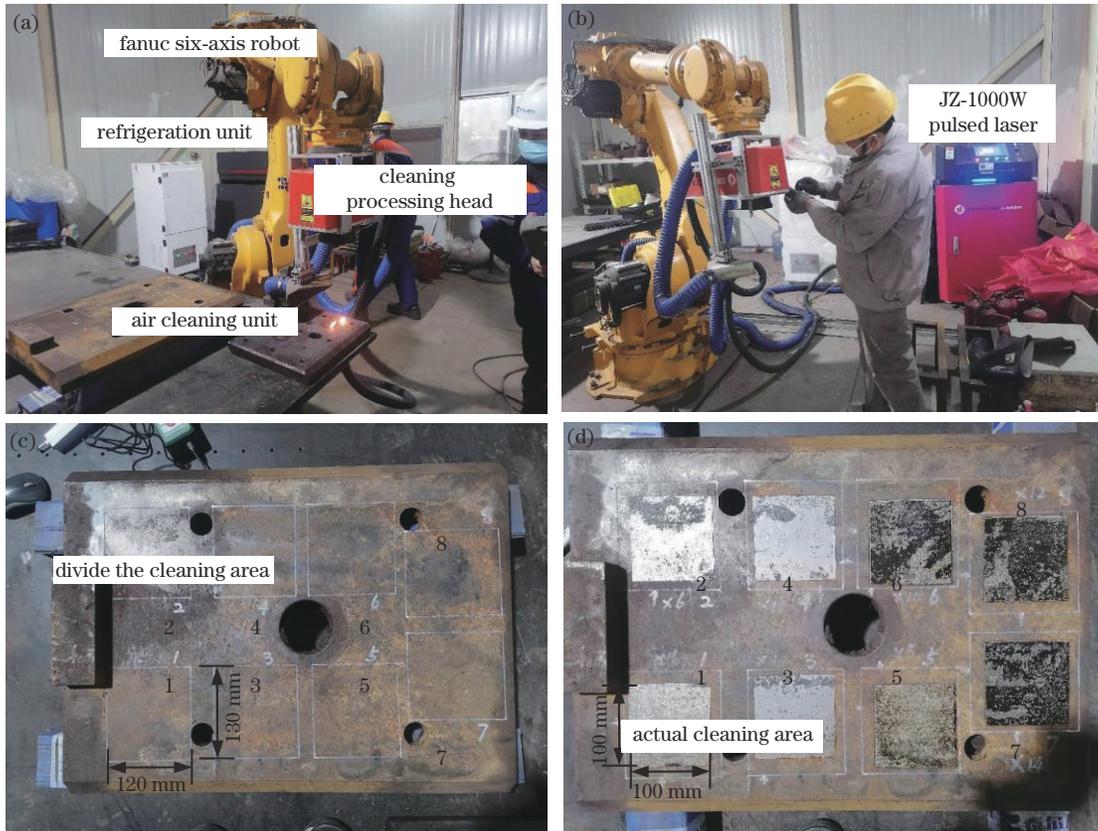


图 11 现场实验装置及清洗前后衬板不同区域效果。(a)~(b) 现场实验装置；(c)~(d) 清洗前后衬板不同区域效果

Fig. 11 Field experimental devices and effect of different areas of lining plate before and after cleaning. (a)~(b) Field experimental device; (c)~(d) effect of different areas of lining plate before and after cleaning

3.2 实验结果及分析

图 12 是当峰值功率密度为 $6.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时, 不同扫描速度(搭接率)下 45 钢表面的 SEM 微观形貌。

如图 12(a) 所示, 当搭接率为 50% 时, 试样表面不光滑, 有大量氧化锈膜和未去除的锈蚀孔洞、熔池。当扫描速度降低, 搭接率提升为 60% 时, 如图 12(b) 所示,

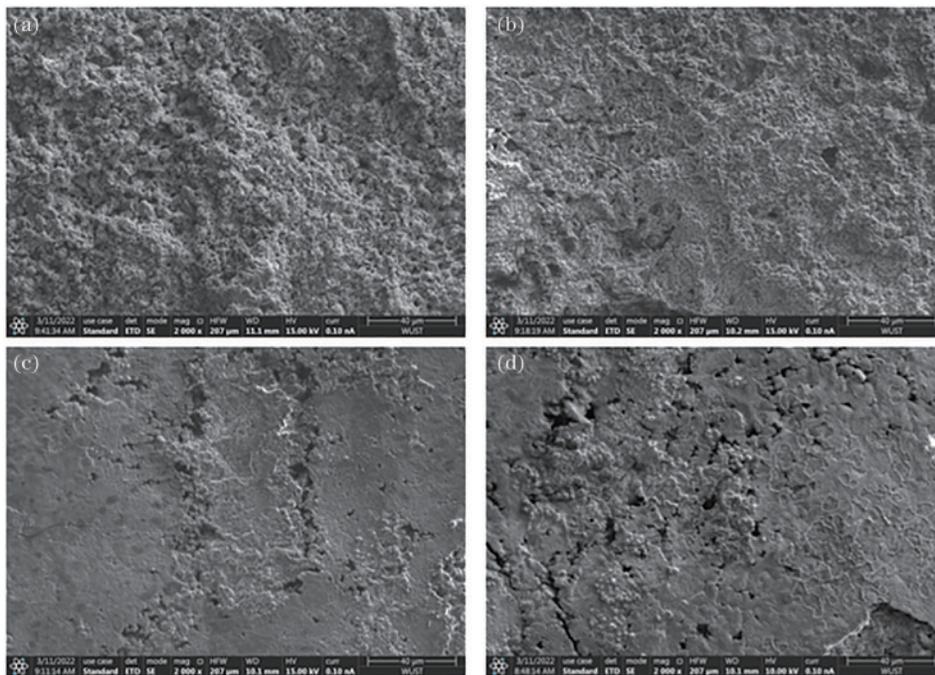


图 12 峰值功率密度为 $6.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, 不同搭接率下的 SEM。(a) 50%; (b) 60%; (c) 70%; (d) 80%

Fig. 12 SEM at different lap rates with a peak power density of $6.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$. (a) 50%; (b) 60%; (c) 70%; (d) 80%

试样表面相比图 12(a)光滑了很多, 锈蚀孔洞减少了很多, 但依旧存在氧化锈膜。图 12(a)、(b)表明, 虽然搭接率增大, 锈层表面单位面积接收的激光能量依旧不足, 锈层吸收能量后只有部分气化消失, 未被完全去除。当搭接率为 70% 时, 如图 12(c) 所示, 相比图 12(a)、(b), 氧化膜基本消失, 基体露出, 残留少许烧蚀孔洞和熔池, 此时锈蚀层已被完全去除。当搭接率为 80% 时, 如图 12(d) 所示, 局部出现大量金属波纹、烧蚀凹坑和熔池, 且烧蚀孔洞相比图 12(c) 明显地加深和增多。分析认为这是由于清洗速度过慢, 激光能量过于集中, 基体在短时间内气化产生极大的热压力克服熔融材料表面张力, 引起爆炸喷溅, 形成了坑洞, 此时基体已经受到破坏。SEM 对比实验表明, 当峰值功率密度为 $6.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 、搭接率为 70% 时, 清洗效果最佳。

工业生产中材料不同的表面粗糙度会影响工件的二次使用。材料表面粗糙度过大, 不仅会使表面残余应力增大影响其使用性能, 还会影响后期装配进而影响其工业性能。图 13 为搭接率为 70% 时, 不同峰值功率密度清洗的材料表面粗糙度曲线图, 其中: R_a 为粗糙度轮廓纵坐标绝对值的算术平均值; R_q 为粗糙度轮廓纵坐标的均方根平均值; R_z 为单个粗糙度深度连续采样长度的算术平均值。当搭接率为 70%、激光峰值功率密度为 $2.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时, 清洗结束后粗糙度 R_a 为 $3.350 \mu\text{m}$, 此时激光除锈不完全, 有大量氧化物残留, 表面粗糙度较高。随着峰值功率密度的升高, 当峰值功率密度为 $4.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时, 粗糙度 R_a 为 $1.836 \mu\text{m}$, 表明光滑度已经有很大提升。当峰值功率密度为 $6.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时, 粗糙度 R_a 为 $0.756 \mu\text{m}$, 材料表面的氧化层和凹坑基本被清除, 其表面粗糙度能够满足工业工艺的使用要求。当峰值功率密度继续增大, 粗糙度 R_a 不降反升, 达到 $2.466 \mu\text{m}$, 这是因为随着峰值功率密度不断增大, 先达到了锈层的清洗阈值, 锈层不断被清除, R_a 不断降低, 而随着峰值功率密度的持续增大, 达到了基体的损伤阈值, 基体开始受到破坏,

材料开始熔化产生烧坑, R_a 不降反升。因此可以判断此时已经达到基体的损伤阈值。

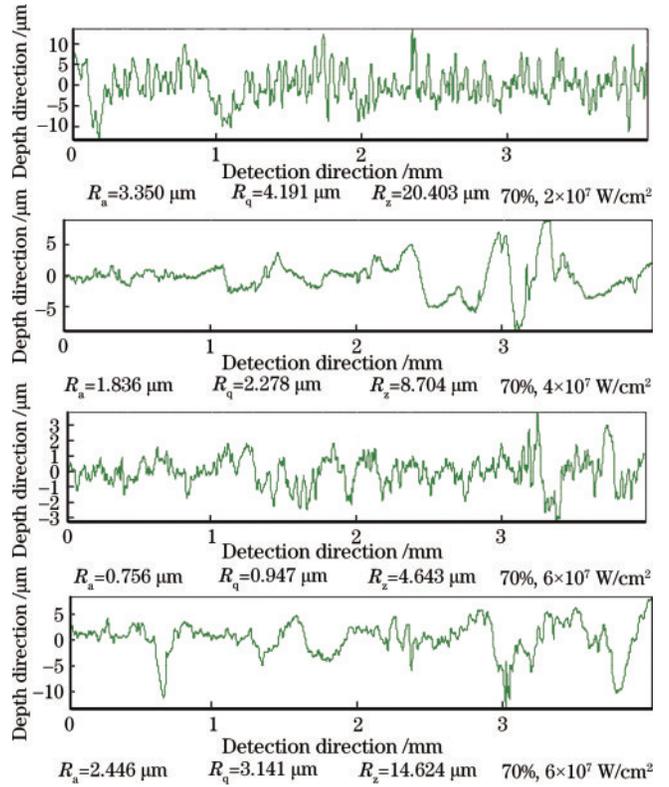


图 13 搭接率为 70%, 不同峰值功率密度清洗的材料表面粗糙度

Fig. 13 Surface roughness after different peak power densities' cleaning with a lap rate of 70%

如图 14 所示, 不同激光峰值功率密度下温度和深度变化的仿真与实验曲线整体走向趋势相似, 深度和温度对应的清洗阈值和损伤阈值区间基本相同, 证明了仿真模型的准确性。激光清洗的实际清洗阈值为 $2.08 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, 理论清洗阈值为 $1.90 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, 此时模拟精度为 91.3%。激光清洗的实际损伤阈值为 $10.4 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, 理论损伤阈值为 $10.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, 此时模拟精度为 96.2%。通过实验和仿真数据对比分析, 模型整体误差小于 10%, 可以保证模型的准确性。

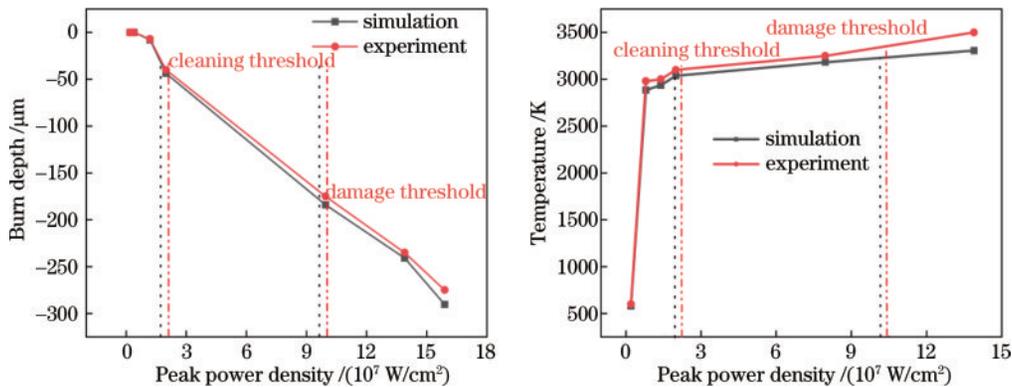


图 14 不同激光峰值功率密度下温度和深度变化的仿真与实验对比

Fig. 14 Simulation and experiment comparison of temperature and depth changes at different laser peak power densities

4 结 论

利用 COMSOL Multiphysics 软件的固体传热和变形几何模块,建立了以热传导为主要形式的能量守恒方程,模拟了激光清洗 45 钢表面锈层的过程,研究激光清洗过程中相关参数对烧蚀深度和温度变化的影响规律,并通过 SEM 和表面粗糙度仪对模拟数值进行了实验验证,得出以下主要结论:

1) 激光清洗演变过程。污染层温度随着烧蚀时间逐渐升高至沸点,产生烧蚀变形,形成微凹坑。演变规律是当光斑直径为 800 μm 、激光功率为 1000 W 时,横向温度场随路径呈高斯态分布,纵向温度随烧蚀深度增加不断降低并趋于室温。表面形貌随时间不断变化,当清洗速度为 0 时,深度随激光作用不断加深,烧蚀宽度在清洗时间为 60 ms 时达到最大值(842.3 μm)。

2) 激光清洗响应规律。当清洗速度一定时,随着峰值功率密度的不断增加,清洗温度不断升高,直至达到锈层气化温度(3300 K 左右);形貌烧蚀深度不断加大,直至 253 μm ;宽度随速度方向不断增大,表现为搭接形貌。峰值功率密度为 $6.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 的清洗效果和效率最佳。峰值功率密度一定时,随扫描速度的提高,温度呈减速上升趋势,形貌烧蚀变化减缓,清洗效率提高,但效果变差。当动态激光扫描速度为 300 mm/s、对应搭接率为 70% 时,清洗效果和效率最佳。

3) 当峰值功率密度为 $6.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,随着搭接率的升高,SEM 显示表面氧化膜和锈蚀孔洞不断减少;当搭接率为 70% 时,表面露出基体和重铸层,锈层被清除,清洗效果最佳;当搭接率继续增大,局部表面能量过于集中,重新出现烧蚀凹坑及熔池,表明基体已受到破坏。当搭接率为 70% 时,随着峰值功率密度的增大,表面粗糙度 R_a 不断减小,当峰值功率密度为 $6.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,表面粗糙度达到最佳($R_a = 0.756$),当峰值功率密度继续增大,超过基体损伤阈值,表面粗糙度不减反升,表面基体已受到破坏。

参 考 文 献

- [1] 王泽敏,曾晓雁,黄维玲. 激光清洗工艺的发展现状与展望[J]. 激光技术, 2000, 24(2): 68-73.
Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Status and prospect of laser cleaning procedure[J]. Laser Technology, 2000, 24(2): 68-73.
- [2] Klein S, Fekrsanati F, Hildenhagen J, et al. Discoloration of marble during laser cleaning by Nd: YAG laser wavelengths[J]. Applied Surface Science, 2001, 171(3/4): 242-251.
- [3] 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.
Lei Z L, Tian Z, Chen Y B. Laser cleaning technology in industrial fields[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030005.
- [4] 王晓东,余锦,貂泽强,等. 激光脱漆技术的研究进展

- [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050005.
Wang X D, Yu J, Mo Z Q, et al. Research progress on laser paint stripping technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050005.
- [5] Ali S N, Taha Z A, Mansour T S. Laser cleaning using Q-switched Nd: YAG laser of low carbon steel alloys[J]. Advances in Condensed Matter Physics, 2014, 2014: 1-6.
- [6] Chan S N, Wong W Y, Walvekar R, et al. Parametric optimization of pulsed laser ablation on stainless steel for improving corrosion resistance by Taguchi method[J]. Materials Research Express, 2018, 6(2): 026533.
- [7] 刘彩飞,冯国英,邓国亮,等. 有限元法移动激光除漆的温度场分析与实验研究[J]. 激光技术, 2016, 40(2): 274-279.
Liu C F, Feng G Y, Deng G L, et al. Temperature field analysis and experiment study about paint irradiated by moving laser based on FEM[J]. Laser Technology, 2016, 40(2): 274-279.
- [8] 闫晓东,任妮,汤富领,等. 移动脉冲激光刻蚀金属/聚酰亚胺数值模拟[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402001.
Yan X D, Ren N, Tang F L, et al. Numerical simulation of movable nanosecond pulse laser etching of metal/polyimide[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402001.
- [9] 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.
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.
- [10] 邱兆飏,朱海红. 脉冲激光除锈工艺研究[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 416-420.
Qiu Z B, Zhu H H. Process parameter study on the removing rust using pulsed laser[J]. Applied Laser, 2013, 33(4): 416-420.
- [11] 谭东晖,陆冬生,宋文栋,等. 激光清洗基片表面温度的有限元分析及讨论[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(6): 50-53.
Tan D H, Lu D S, Song W D, et al. A finite element analysis of the temperature distribution on a substrate surface during laser cleaning[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1996, 24(6): 50-53.
- [12] 谭东晖,陆冬生,宋文栋,等. 准分子激光直接清洗硅片上油脂的实验研究[J]. 激光技术, 1995, 19(5): 319-320.
Tan D H, Lu D S, Song W D, et al. Experiment studies of excimer laser cleaning of grease-contaminated Si substrate[J]. Laser Technology, 1995, 19(5): 319-320.
- [13] 孙兴伟,张众,杨赫然,等. 基于响应面法与粒子群算法的石油管螺纹激光清洗工艺参数优化[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2202001.
Sun X W, Zhang Z, Yang H R, et al. Optimization of laser cleaning process parameters of oil pipe threads based on response surface method and particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2202001.
- [14] 王春生,王洪潇,徐惠妍,等. 车轴激光清洗表面质量分析及在线评估[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 0802005.

- Wang C S, Wang H X, Xu H Y, et al. Quality analysis and online evaluation of axle surface after laser cleaning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 0802005.
- [15] 廖大松, 汪倩, 王非森, 等. 纳秒脉冲激光清洗扫描速度对 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 cleaning quality of oxide films on TC4 titanium alloy surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(4): 0402020.
- [16] 刘伟军, 张铭祺, 李强, 等. 激光清洗工艺参数对 TC4 钛合金表面除漆的影响[J]. 中国激光, 2023, 50(4): 101-109.
- Liu W J, Zhang M Q, Li Q, et al. Effect of laser cleaning process parameters on surface paint removal of TC4 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(4): 101-109.
- [17] Zhu G D, Wang S R, Cheng W, et al. Corrosion and wear performance of aircraft skin after laser cleaning[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106475.
- [18] 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.
- Li W. Mechanism research and equipment development of laser cleaning corrosion[D]. Tianjin: Nankai University, 2014.
- [19] 蒋一岚, 叶亚云, 周国瑞, 等. 飞机蒙皮的激光除漆技术研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 29-35.
- Jiang Y L, Ye Y Y, Zhou G R, et al. Research on laser paint removing of aircraft surface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 29-35.
- [20] 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.
- 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.