

# 基于有限元模拟研究激光除锈时 金属基底表面温度场

任志国<sup>1,2</sup>, 陈静<sup>1</sup>, 陈怀宁<sup>1</sup>

(1.中国科学院金属研究所 中国科学院核用材料与安全评价重点实验室, 沈阳 110016;  
2.中国科学技术大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110016)

**摘要:** **目的** 根据激光除锈后金属基底表面熔池直径, 通过有限元模拟, 表征激光除锈时金属基底表面温度场分布。**方法** 考虑到激光除锈时, 使用的脉冲激光具有功率小、重复频率大和脉宽短的特征以及金属具有对激光反射率大的特征, 采用高斯面热源和有限元网格划分策略, 可以较好地实现描述激光除锈时金属基底表面温度场分布。采用白光干涉仪和扫描电子显微镜测量和观察激光除锈后金属基底表面熔池的尺寸。**结果** 经过反复模拟计算和实验结果对比, 最终确定高斯面热源参数为: 热源效率 48%, 高斯系数 1, 热源半径 30  $\mu\text{m}$ 。根据金属基底表面单个节点温度与时间的关系, 分析表明在激光除锈过程中, 金属基底表面形成了一个极快速的加热冷却温度场。**结论** 根据激光除锈后金属基底表面熔池直径, 确定热源模型参数, 进而通过模拟计算得到了较为准确的金属基底表面温度场的分布。

**关键词:** 激光除锈; 温度场; 表面形貌; 热源模型; 金属基底

**中图分类号:** TG178; U671.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0321-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.043

## Surface Temperature Field on Metal Substrate during Laser Derusting Based on Finite Element Simulation

REN Zhi-guo<sup>1,2</sup>, CHEN Jing<sup>1</sup>, CHEN Huai-ning<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Nuclear Materials and Safety Assessment, Institute of Metal Research,  
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2.School of Materials Science and Engineering,  
University of Science and Technology of China, Shenyang 110016, China)

**ABSTRACT:** According to the diameter of the molten pool on the surface of the metal substrate after laser derusting, the temperature field distribution of the metal substrate surface is characterized by finite element simulation. The pulsed laser used in laser descaling had the characteristics of small laser power, large repetition frequency, short pulse width and high metal reflectance. Therefore, Gaussian surface heat source and finite element meshing strategy could be used to describe temperature field distribution on the surface of the metal substrate during laser derusting. The size of the molten pool on the surface of the metal substrate after laser derusting was measured and observed by a white light interferometer and a scanning electron microscope. After repeated simulation calculations and comparison of experimental results, the parameters of the Gaussian surface heat

收稿日期: 2018-04-24; 修订日期: 2018-06-15

Received: 2018-04-24; Revised: 2018-06-15

基金项目: 任志国 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光加工研究、焊接接头质量控制和检测。

Fund: REN Zhi-guo (1993—), Male, Master, Research focus: laser processing research, welding joint quality control and testing.

通讯作者: 陈怀宁 (1962—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为焊接接头性能控制技术、焊接残余应力测量和控制技术、可靠性连接技术。邮箱: hnchen@imr.ac.cn

Corresponding author: CHEN Huai-ning (1962—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: control technology of welded joint performance, welding residual stress measurement and control technology, reliability connection technology. E-mail: hnchen@imr.ac.cn

source were determined as follows: heat source efficiency of 48%, gaussian coefficient of 1 and heat source radius of 30  $\mu\text{m}$ . According to the relationship between temperature and time of a single node on the surface of the metal substrate, a very rapid heating and cooling temperature field was formed on the surface of the metal substrate during the laser derusting process. According to the diameter of the molten pool on the surface of the metal substrate after laser derusting, the parameters of the pyro-gen model are determined, and the more accurate distribution of the temperature field on the surface of the metal substrate is obtained by simulation calculations.

**KEY WORDS:** laser derusting; temperature field; surface topography; heat source model; metal substrate

激光除锈技术作为一种绿色环保的新型除锈方法,在国内外有广阔的发展前景。目前,关于激光除锈机理和激光除锈参数对除锈效果影响的研究报道很多<sup>[1-4]</sup>。Andrew C. Tam 等人<sup>[5-6]</sup>通过研究激光清洗的清洗机制和清洗类型,认为利用短脉冲激光可以有效地去除表面污染物颗粒。施曙东等人<sup>[7]</sup>通过模拟和实验,结果表明,在污染物阈值的清洗条件下,有效清洗机理是振动效应;而有基底损伤时,有效清洗机理是振动效应和烧蚀效应。Wang 等人<sup>[8]</sup>研究了激光能量密度、脉冲重复频率、扫描速度等激光清洗参数对 Q235 钢表面锈蚀去除效果的影响。Brygo 等人<sup>[9]</sup>研究了激光能量密度、重复频率以及脉冲宽度等因素对激光除锈效率的影响。田彬等人<sup>[10]</sup>通过实验验证激光除锈效果,初步得到了激光清洗阈值、清洗效率等数据。解宇飞等人<sup>[11]</sup>提出利用单线扫描的清洗方式来确定船舶板材的激光除锈工艺参数。

在激光除锈过程中,由于锈层的不均匀性会导致部分激光透过锈层直接与金属基底作用,同时经激光辐射的表面锈层也会通过热传导的形式将部分激光能量传递到金属基底表面。很多研究报道通过调节激光除锈参数使激光能量密度大于锈蚀清洗阈值、小于金属基底损伤阈值,来达到除锈效果<sup>[12-15]</sup>。也有研究报道使用连续 Nd:YAG 激光和 CO<sub>2</sub> 激光在氩气环境下照射不锈钢材料表面,发现激光照射引起了材料表面的熔化,在钢铁表面形成了一层均匀、厚度非常小、呈胞状枝形结构的薄膜,使金属基底表面性能得到改善<sup>[16-17]</sup>。已有的研究主要是通过激光除锈后金属基底的表面状态来研究激光除锈技术对金属基底性能的影响,但是金属基底的表面状态主要受其表面温度场分布的影响,所以了解激光除锈时金属基底表面温度场的分布对于研究激光除锈技术对金属基底的影响有重要意义。但是由于激光除锈技术所使用的脉冲激光具有激光功率小、重复频率大和脉宽短的特征,使得金属基底表面形成一个能极快加热和冷却的温度场,同时受到在激光除锈过程中锈蚀去除的复杂性和测温设备的限制,所以很难用实验方法准确监测金属基底表面温度场的分布。

本文主要基于有限元模拟研究激光除锈时金属基底表面温度场的分布特征,根据激光除锈后金属基底表面熔池大小的实验数据,经过反复模拟计算,确定合理的热源模型参数,进而通过模拟计算得到较为

准确的金属基底表面温度场分布。本文结果对于继续深入研究激光除锈技术对金属基底组织性能的影响具有一定参考价值。

## 1 有限元模型建立

### 1.1 单元模型建立

在激光除锈过程中,脉冲激光光斑选用的是线型填充方式,如图 1 所示。为了提高激光除锈效率,选取的激光光斑恰好可以完全覆盖试样整个表面,如图 2 所示。即在二维平面内,当激光光斑中心距  $d$  和光斑半径  $R$  满足关系式 (1) 时,相邻对角线的光斑之间相切,激光光斑能够完全覆盖试样整个表面。

$$R = d \cos 45^\circ \quad (1)$$

式中  $R=0.01 \text{ mm}$ , 可以得到  $d=0.014 \text{ mm}$ , 即当

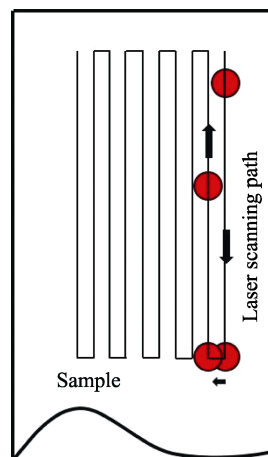


图 1 线型填充方式  
Fig.1 Line filling method

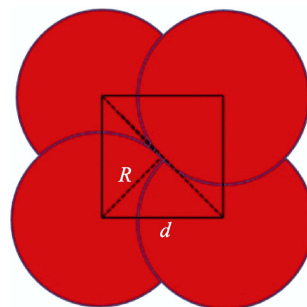


图 2 光斑搭接  
Fig.2 Laser spot lap

光斑搭接率为 29.3% 时, 激光光斑恰好完全覆盖整个试样表面。

在网格划分时, 考虑到计算精确和时间的经济性, 经过反复计算和分析, 参考实验所用试样的尺寸, 确定激光除锈的仿真计算模型如下: 激光除锈试样尺寸为 20 mm×5 mm×1 mm, 激光除锈部分宽度为 0.5 mm。考虑到相邻激光光斑中心距为 0.014 mm, 为了便于模拟中设置激光光斑的行走路径, 单元网格划分为 0.014 mm×0.014 mm×0.02 mm, 且单元网格随热源移动自动细划分。考虑到模拟计算时间的合理性和线型填充路径的个数具有代表性, 设置线型填充路径个数为 10。由于在实验室环境中进行的激光除锈实验是在稳定的传热条件下进行的, 所以在模拟时, 低碳钢除锈试样的初始温度为环境温度 (室温 20 ℃), 对流换热系数  $h=20.0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , 传热系数  $\alpha=1000.0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , 辐射系数  $\varepsilon=0.6$ 。确定的模型由金属基底和激光除锈平台组成, 而模型中的激光除锈平台设置只起到支撑的作用, 结果如图 3 所示。

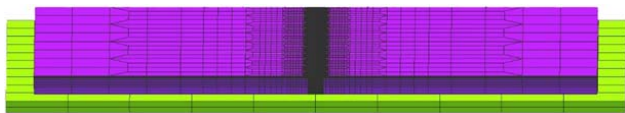


图 3 有限元模型  
Fig.3 Finite element model

1.2 热源模型选择

在激光除锈过程中, 由于所用的脉冲激光脉宽短 (100 ns)、扫描速度快且金属对激光反射率大, 所以激光主要与金属基底表面作用, 对金属基底深度方向的影响很小。根据激光除锈过程中脉冲激光对金属基底作用的分析, 选用高斯面热源模型。高斯面热源热流  $q$  的径向分布规律为:

$$q(r)=\frac{Q}{\pi R^2}\exp\left(-\frac{r^2}{R^2}\right)$$

(2)

式中:  $r$  为离加热斑点中心的距离,  $Q$  为脉冲激光平均功率,  $\eta$  为热源效率,  $R$  为激光光斑的有效加热半径。

1.3 材料参数设置

实验材料为低碳钢, 其部分性能参数如表 1 所示, 热物理常数随温度的变化如图 4 所示。

表 1 低碳钢的部分性能参数

Tab.1 Partial performance parameters of low carbon steel

Poisson $\nu$	Solidus temperature/℃	Melting temperature/℃	Latent heat/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> )
0.3	1466.85	1517.14	2.564×10 <sup>11</sup>

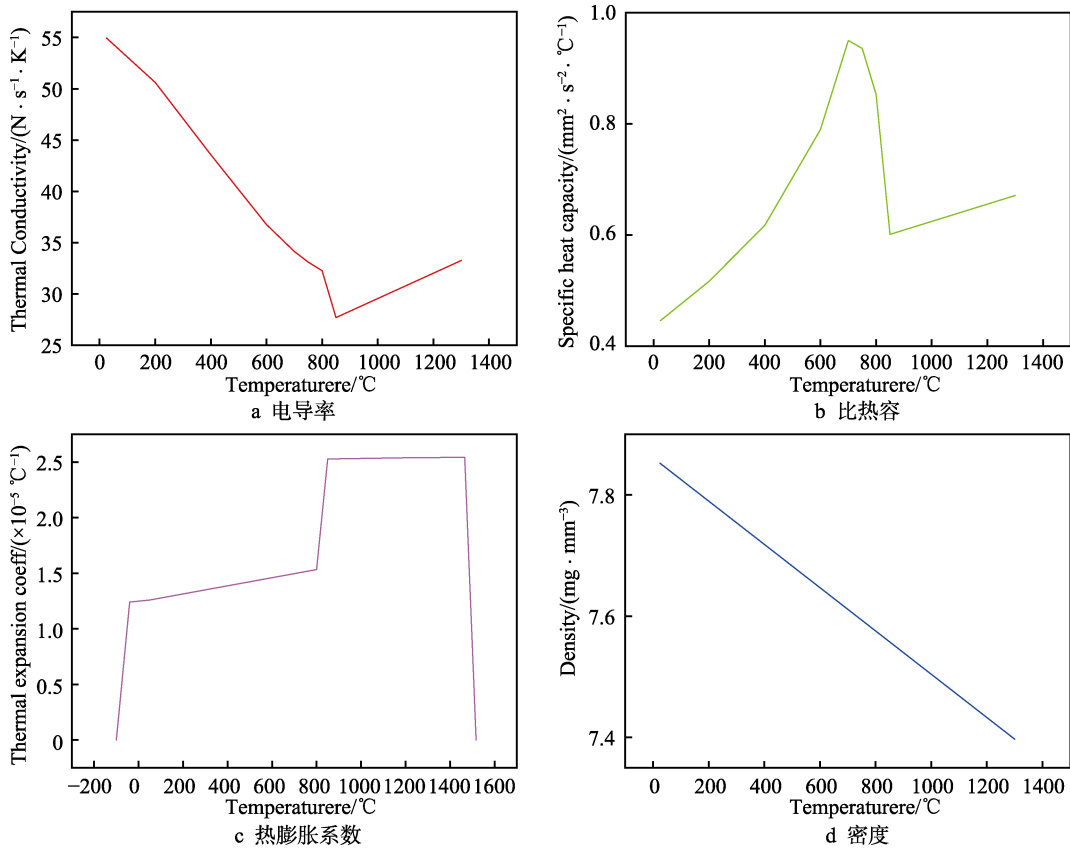


图 4 低碳钢热物理常数随温度的变化  
Fig.4 Changes of low carbon steel thermal physical constants with temperature: a) conductivity; b) specific heat capacity; c) coefficient of thermal expansion; d) density

## 2 模拟与实验结果对比分析

### 2.1 激光除锈后金属基底表面形貌

对尺寸 20 mm×5 mm×5 mm 的低碳钢锈蚀表面进行激光除锈处理,采用白光干涉仪对激光除锈后的金属基底表面进行扫描,获得如图 5 所示的三维形貌图和有关尺寸。采用扫描电子显微镜对激光除锈后的金属基底表面形貌进行观察,如图 6 所示。图 5 和图 6 表明,激光除锈后的金属基底表面的光斑痕迹沿着激光的扫描路径方向呈有序排列,且在光斑痕迹的边缘部位分布着金属基底重熔后快速冷却凝固形成的小熔珠。在图 6 中, a 部分为激光光斑以 29.3% 搭接率、线型填充方式进行扫描所形成的表面形貌示意图,与激光除锈后金属基底表面的光斑痕迹 b 部分形状相似。

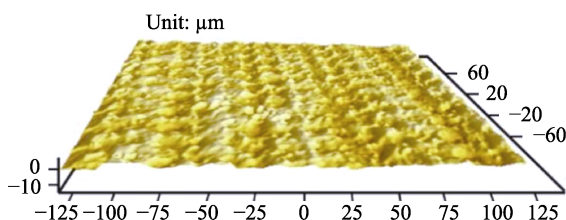


图 5 金属基底表面三维形貌图  
Fig.5 Three dimensional morphologies of metal substrate surface

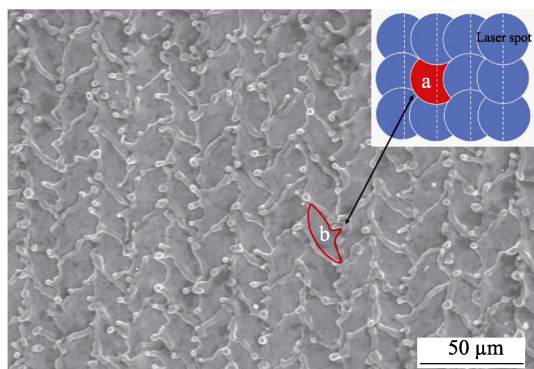


图 6 激光除锈后金属基底表面 SEM 形貌图  
Fig.6 Surface SEM topography of metal substrate after laser derusting

根据激光除锈后金属基底表面形貌分析表明,在激光除锈过程中,部分激光透过锈层直接与金属基底作用以及表面锈层通过热传导的形式将部分激光能量传递到金属基底表面,使金属基底表面发生重熔,导致在激光光斑有效加热范围内形成了熔池。熔池的形成主要是由于在激光除锈过程中,金属基底表面温度达到熔点以上,在激光脉冲载荷的作用下,激光光斑中心熔化的金属材料向边缘排挤。同时,由于激光除锈技术所使用的脉冲激光具有激光功率小、重复频率大、脉宽短的特点,使得金属基底表面形成一个极快速的加热冷却温度场。所以在激光除锈后的金属基

底表面形成了激光光斑中心下凹,边缘分布小熔珠的熔池。

根据金属基底表面熔池直径以及深度的大小,可以设置合理的热源模型参数,进而得到金属基底表面温度场分布。但是,由于激光光斑对重熔金属的冲击作用使光斑中心下凹,在冷却凝固时会有部分重熔金属材料填充,使得测量的熔池深度与激光除锈过程中形成熔池的实际深度有偏差。所以本文主要根据金属基底表面熔池的直径来设置热源模型参数。

### 2.2 热源模型参数的确定

在激光除锈过程中,由于所用脉冲激光脉宽短、扫描速度快而且金属对激光反射率大,脉冲激光对金属基底深度方向的影响很小,故高斯系数的选择对热源在深度方向的影响至关重要。在激光除锈过程中,锈层的致密度、厚度以及金属基底对激光的反射率等因素影响激光与金属基底作用的效率,故需要准确确定模拟计算时采用的热源效率。采用白光干涉仪对激光除锈后金属基底表面熔池尺寸进行测量,经过反复模拟计算和实验对比分析,根据激光除锈后金属基底表面熔池尺寸以及激光除锈时的激光参数确定热源模型参数,如表 2 所示。

表 2 高斯面热源参数  
Tab.2 Parameters of Gauss surface heat source

Heat source efficiency/%	Gauss coefficient	Heat source radius/μm	Simulated pool radius/μm	Measured pool radius/μm
48	1	30	26.91	26.03

按照最终确定的热源模型参数进行模拟计算,得到单个线型填充路径形成的金属基底横截面熔池,如图 7a 所示,其与实际测量的金属基底表面熔池尺寸相近。两个线型填充路径形成的金属基底横截面熔池如图 7b 所示,其大小相当于两个熔池的叠加。在模拟计算中,由于前两个线型填充路径对金属基底是一个预热过程,所以形成明显的熔池叠加形状。当热源作用到最高温度趋于稳定时,形成如图 7c 所示的金属基底横截面熔池。

根据单个线型填充路径形成的熔池的尺寸和线型路径的间距,将 10 个熔池进行叠加,其示意图如图 8 所示。当热源作用在前两个和后两个线型填充路径时,由于在线型路径的折叠处,最高温度会超过金属熔点,所以在实际模拟计算中形成的熔池尺寸会大于示意图中最高温度趋于稳定的中间 6 个线型填充路径所形成的熔池尺寸。模拟得到的金属基底表面熔池尺寸与激光除锈过程中金属基底表面形成的熔池尺寸相符,再考虑到实验和模拟试样在激光加热停止后 1 s 的温度值相近(约 80 ℃),可以确定上述热源模型尺寸和高斯热源参数的选择是合适的。



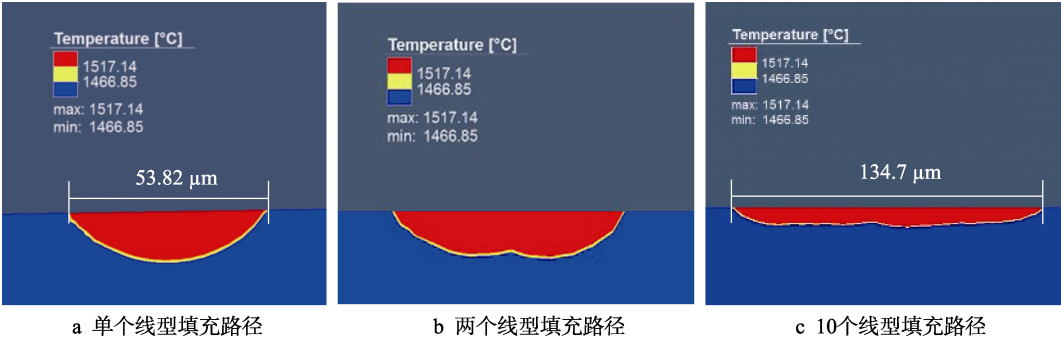


图 7 金属基底模拟横截面熔池形貌

Fig.7 Topography of simulated cross section molten pool on metal substrate:  
a) single linear fill path; b) two linear filling paths; c) ten linear filling paths

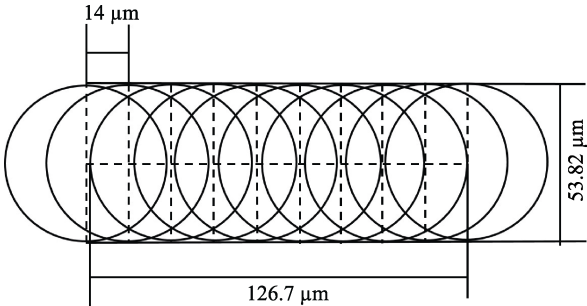


图 8 10 个线型填充路径熔池横截面熔池叠加示意图  
Fig.8 Overlay diagram of cross section molten pool of 10 linear filling paths

2.3 除锈过程得到的金属基底熔池形状的模拟和实验结果

激光除锈过程中，作用到锈蚀表面的激光能量密度不同会导致对金属基底产生的影响不一样。因此，

在其他激光除锈参数不变的情况下，可通过改变激光功率来改变作用到锈蚀表面的激光能量密度。分别选用平均功率为 8、12、16 W 的脉冲激光对低碳钢表面进行激光除锈，在扫描电镜下观察到的金属基底表面形貌如图 9 所示。基于有限元模拟软件，通过改变热源模型的激光输入功率来改变高斯面热源的热输入能量，得到的金属基底模拟横截面熔池形貌如图 10 所示。

图 9 表明，脉冲激光平均功率为 8 W 时，激光能量密度低，金属基底表面最高温度为 700 °C 左右，金属基底模拟横截面上没有熔池形成。但是由于金属基底温度的升高，在激光光斑冲击力作用下，金属基底表面的光斑痕迹沿着激光光斑的扫描路径方向呈有序排列。脉冲激光平均功率为 12 W 时，金属基底表面温度可达到 1200 °C 以上，在激光光斑冲击力作用下，光斑边缘处金属材料的堆叠量增加，在紧邻的 4 个

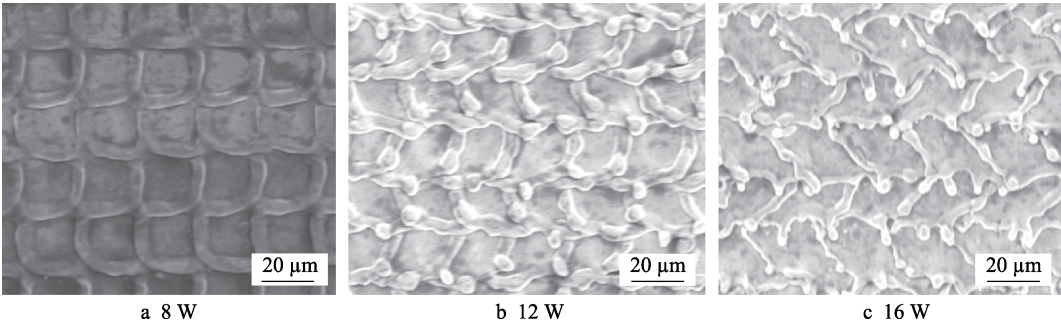


图 9 不同激光功率下的金属基底表面形貌

Fig.9 Surface topography of metal substrates under different laser power

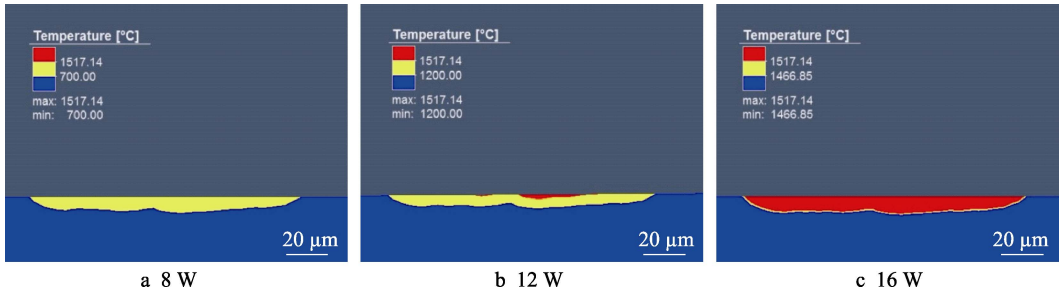


图 10 不同激光功率下金属基底模拟横截面熔池形貌

Fig.10 Topography of simulated cross section molten pool under different laser power

光斑的搭接处形成明显凸起。根据模拟结果(图11),在线性填充路径的折叠处,金属基底的温度会迅速升高超过低碳钢的熔点,所以在金属基底模拟横截面上会形成图10b所示的熔池形貌。当脉冲激光平均功率增大到16 W时,金属基底表面最高温度为1700℃左右,达到熔点以上,在激光冲击力作用下,金属基底表面形成光斑中心下凹、光斑边缘分布有小熔珠的熔池,其形貌如图10c所示。

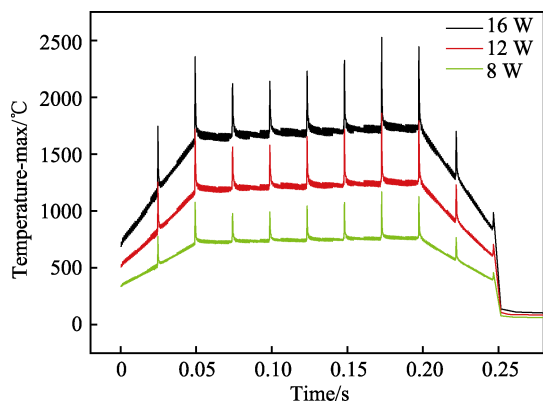
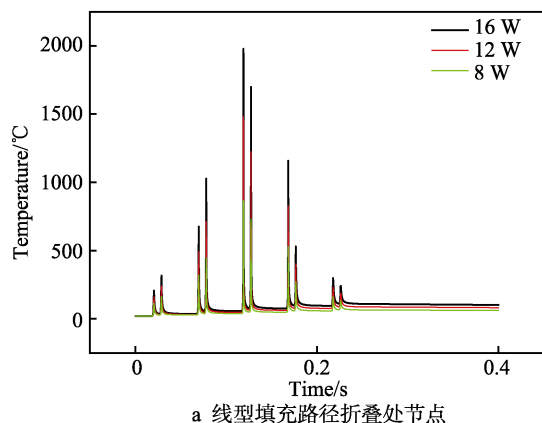
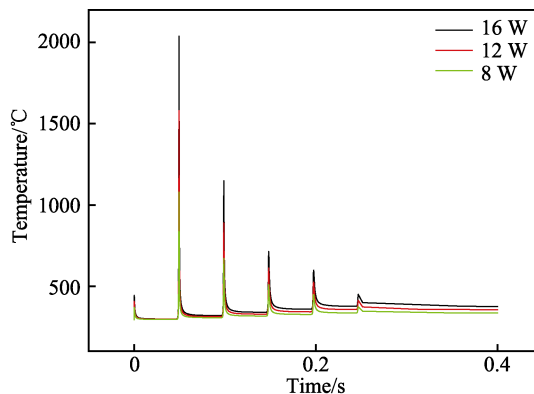


图11 金属基底表面最高温度与时间的关系  
Fig.11 Relationship between maximum temperature on metal substrate surface and time



a 线型填充路径折叠处节点



b 线型填充路径中间节点

图12 金属基底表面单个节点温度与时间的关系

Fig.12 Relationship between temperature and time of a single node on the surface of a metal substrate:  
a) node of linear filling path at folding; b) intermediate node of linear filling path

### 3 结论

1) 由于激光除锈技术存在所用脉冲激光功率小、重复频率大、脉宽短以及金属对激光反射率大的特征,采用高斯面热源和有限元网格划分策略,可较好地描述激光除锈时金属基底表面温度场分布。

2) 根据激光除锈后金属基底表面熔池的尺寸,经过反复模拟和计算,最终确定的高斯面热源参数为:热源效率48%,高斯面热源系数1,热源半径30 μm。

3) 金属基底表面单个节点温度与时间的关系表明,在激光除锈过程中,金属基底表面形成了一个极快速的加热冷却温度场。

三种不同激光输入功率下模拟得到的金属基底表面最高温度与时间的关系如图11所示。图11表明,在模拟计算中,当激光作用到金属基底时,基底表面最高温度迅速升高;当激光作用到两个线型填充路径时,金属基底表面最高温度趋于稳定不变。在线型填充路径的折叠处,由于相邻激光光斑的两次作用,使最高温度快速升高后又快速降低到稳定值。当激光作用到最后两个线型填充路径时,金属基底表面最高温度呈迅速下降的趋势,直到降低到室温。

模拟计算中,通过对模型中单个节点温度的跟踪,得到金属基底表面单个节点温度与时间的关系,如图12所示。图12a中表征的是两个线型填充路径折叠处节点温度与时间的关系,在折叠处的节点,由于相邻激光光斑的两次作用,使其温度连续两次迅速地升高和降低。图12b中表征的是两个线型填充路径中间节点温度与时间的关系,当激光作用到该节点时,温度快速升高后又快速降低。由于相邻线型填充路径的距离为14 μm,热源半径为30 μm,当激光作用在相邻线型填充路径时会对中间搭接节点产生热影响,所以在最高温度左右会出现几组低于最高温度的峰。上述结果表明,在激光除锈过程中,金属基底表面形成了一个极快速的加热冷却温度场。

### 参考文献:

- [1] LAFARGUE P E, CHAOU I N, MILLON E, et al. The laser ablation/desorption process used as a new method for cleaning treatment of low carbon steel sheets[J]. Surface & coatings technology, 1998, 106(2-3): 268-276.
- [2] AUTRIC M L, OLTRA R. Basic processes of pulsed laser materials interaction: Applications to laser cleaning of oxidized surfaces[J]. Proceedings of spie—The international society for optical engineering, 2005, 5777: 982-985.
- [3] 凌晨, 季凌飞, 吴燕, 等. 金属正畸托槽皮秒激光清洗实验及其机理研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 84-90.  
LING Chen, JI Ling-fei, WU Yan, et al. Research and

- mechanism study on refurbishing stainless bracket using picosecond laser based on laser cleaning technology[J]. Chinese journal of lasers, 2014, 41(4): 84-90.
- [4] KOH Y, SARADY I. Removal of adhesives and coatings on iron artifacts using pulsed TEA CO<sub>2</sub> and Nd: YAG lasers[J]. Proceedings of SPIE—The international society for optical engineering, 2001, 4402: 46-53.
- [5] TAM A C, LEUNG W P, ZAPKA W, et al. Laser cleaning techniques for the removal of surface particulates[J]. Journal of applied physics, 1992, 71(7): 3515-3523.
- [6] TAM A C, PARK H K, GRIGOROPOULOS C P. Laser cleaning of surface contaminants[J]. Applied surface science, 1998, 127-129: 721-725.
- [7] 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): 56-64.
- SHI Shu-dong, DU Peng, LI Wei, et al. Research on paint removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser[J]. Chinese journal of lasers, 2012, 39(9): 56-64.
- [8] WANG Z, ZENG X, HUANG W. Parameters and surface performance of laser removal of rust layer on A3 steel[J]. Surface & coatings technology, 2003, 166(1): 10-16.
- [9] BRYGO F, SEMEROK A, OLTRA R, et al. Laser heating and ablation at high repetition rate in thermal confinement regime[J]. Applied surface science, 2006, 252(23): 8314-8318.
- [10] 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.
- TIAN Bin, ZOU Wan-fang, LIU Shu-jing, et al. Introduction of rust removed by dry laser cleaning[J]. Cleaning world, 2006, 22(8): 33-38.
- [11] 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): 109-116.
- XIE Yu-fei, LIU Hong-wei, HU Yong-xiang. Determining process parameters for laser derusting of ship steel plates [J]. Chinese journal of lasers, 2016, 43(4): 109-116.
- [12] 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 Zhao-biao, ZHU Hai-hong. Process parameter study on the removing rust using pulsed laser[J]. Applied laser, 2013, 33(4): 416-420.
- [13] XU J, SUN Z, ZHOU W. Real-time monitoring technique for laser cleaning rust deposite[J]. Acta photonica sinica, 2002, 31(9): 1090-1092.
- [14] KE L. Laser cleaning of rust on ship steel using TEA CO<sub>2</sub> pulsed laser[J]. Proceedings of SPIE—The international society for optical engineering, 2009, 7515: 1-8.
- [15] DAURELIO G, CHITA G, CINQUEPALMI M. Laser surface cleaning, de-rusting, de-painting and de-oxidizing[J]. Applied physics A, 1999, 69(1): S543-S546.
- [16] KWOK C T, MAN H C, CHENG F T. Cavitation erosion and pitting corrosion of laser surface melted stainless steels [J]. Surface & coatings technology, 1998, 99(3): 295-304.
- [17] CONDE A, COLACO R, VILOR R, et al. Corrosion behaviour of steels after laser surface melting[J]. Materials & design, 2013, 21(5): 441-445.