

激光清洗 5083 铝合金表面漆层的数值模拟与试验研究

万 磊,王裕光,左小艳,张成俊,张 驰,王 军
(武汉纺织大学机械工程与自动化学院,湖北 武汉 430200)

摘 要:为了探索不同功率的激光对铝合金表面漆层的温度场分布以及清洗深度的影响,以及光斑搭接率对清洗效果的影响,利用 COMSOL multiphysics 软件建立了光纤脉冲激光清洗 5083 铝合金表面漆层的数值模型,最后得既能防止基体表面受到损坏,也能够使得漆层材料完全去除的激光功率,以及可以获得良好清洗效果的光斑搭接率,并用实验来得以验证。结果表明:激光重复频率为 100 kHz 时,激光功率越大,试样表面温度上升越快,烧蚀深度也随之增加。当 30 W 的激光功率基本上可以保证去除掉漆层且不伤及基体表面,对基体材料的烧蚀深度为 10 μm 。在激光功率为 30 W,光斑搭接率为 50 % 的实验参数下,试样表面粗糙度较清洗前降低,为 4.48 μm ,在该实验参数下可以获得不伤及铝合金基体的良好的清洗效果。该实验结果可以为光纤脉冲激光清洗的工艺参数的选择提供参考。

关键词:激光清洗;数值模拟;光纤脉冲激光;5083 铝合金;表面粗糙度

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.06.003

Numerical simulation and experimental study on laser cleaning of 5083 aluminum alloy surface paint layer

WAN Lei, WANG Yu-guang, ZUO Xiao-yan, CHANG Cheng-jun, ZHANG Chi, WANG Jun
(School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract: In order to explore the influence of different power lasers on the temperature field distribution and cleaning depth of the aluminum alloy surface paint layer, as well as the effect of the spot overlap rate on the cleaning effect, the COMSOL multiphysics software is used to establish a numerical model of 5083 aluminum alloy surface paint layer with fiber pulse laser cleaning. Finally, the laser powers that can not only prevent the substrate surface from being damaged, but also make the coating material completely removed, as well as the spot lap ratio that can obtain good cleaning effect, are verified by experiments. The results show that when the laser repetition frequency is 100 kHz, the greater the laser power, the faster the temperature of the sample surface rises, and the ablation depth also increases. When the laser power of 30 W can basically ensure that the paint layer is removed without damaging the surface of the substrate and the ablation depth of the substrate material is 10 μm . Under the experimental parameters with laser power of 30 W and spot overlap rate of 50 %, the sample surface roughness is reduced to 4.48 μm before cleaning. Thus, a good cleaning effect without damaging the aluminum alloy substrate can be obtained. The experimental results can provide a reference for the selection of process parameters of fiber pulse laser cleaning.

Keywords: laser cleaning; numerical simulation; pulsed laser; 5083 aluminum alloy; surface roughness

基金项目:湖北省自然科学基金项目(No. CFB619)资助。

作者简介:万 磊(1995 -)男,硕士研究生,主要从事于激光清洗方面的研究。E-mail:wl2680357493@163.com

通讯作者:王 军(1976 -),男,博士,副教授,主要从事先进激光制造技术方面的研究。E-mail:wangjunwuhan@163.com

收稿日期:2021-06-10

1 引言

在日常生活和工业领域中不可避免地需要用油漆来保护金属。但是当金属工作时间久了后,油漆会逐渐脱落而不能起到保护金属的作用,金属材料也要进行定期缺陷检测以及疲劳裂纹检测^[1]。所以需要去除掉金属材料表面原有的漆层。传统的除漆方法如机械打磨清洗,喷砂清洗,化学清洗除漆等,不仅过程繁琐,清洗效率低下,对环境以及工人都有一定的危害,而且清洗之后会对工件表面造成一定的损伤^[2,3]。激光清洗是一种新型的非接触式表面污染物去除技术,具有高效,绿色环保,精确度高,自动化程度高等有点^[4]。目前在工业领域逐渐应用于金属表面的除漆和除锈清洗工作。激光清洗的原理是利用激光是光束中的高能量直接辐照在待清洗工件的表面,使得污物与基体表面发生一系列的物理化学变化,让污物与基体表面发生脱离,如图 1 所示。在除漆过程中,基体以及漆层都会吸收激光的能量而产生温度场,因为漆层和基体都有自己的熔点以及沸点,所以温度的变化可以直接反应清洗效果的主要因素,而漆层以及基体表面的温度不好直接测得,为了得出可以去除漆层而不伤及基体的温度阈值,进而得出激光功率阈值,因此采用有限元分析方法来研究温度场分析和计算,给予试验研究有力的指导^[5]。

目前,已有一部分的研究人员针对激光清洗金属表面漆层的除漆机理,工艺参数等方面展开了一系列的研究。元泉等^[6]研究了脉冲激光对铝合金漆层和氧化层清洗效果的影响,通过对单脉冲能量、光斑搭接率、离焦量等参数对试验的影响,研究发现过高的单脉冲能量和光斑搭接率虽然会很好的去除漆层和氧化层,但是会对基体表面造成损伤;适当的离焦量可以更好的清洗掉分布没有规则的漆层。实验结果显示单脉冲能量为 0.45 mJ、光斑搭接率为 33%、离焦量为 1 mm 时可以达到很好的清洗效果且不会伤及铝合金基底。Madhukar Y K 等^[7]研究了激光工作模式对光纤激光器除漆效果的影响,对铝合金和不锈钢两种基板上的油漆进行清除试验,激光模式从调制状态下的 5%~100%(连续),结果表明无论哪种模式均存在一系列的工艺参数使得基板上的油漆能够被完全除去而不损伤,还发现了在 150 Hz 调制频率下,占空比为 5%且光斑搭接率

为 50%时的除漆效率最高。赵海朝^[8]等人研究了脉冲激光对 2024 铝合金表面漆层的清洗试验,利用 COMSOL Multiphysics 建立该清洗模型,研究当激光清洗时漆层内不同深度的温度分布以及应力分布、组成漆层的高聚物分子中 C-H、C=O、C-C 的化学键断裂以及内聚力的破坏来分析激光除漆机制。结果发现:激光功率为 16.5 W、扫描速度为 600 mm/s、脉冲频率为 30 kHz 时可以达到很好的清洗效果。且激光去除漆层的机理主要为漆层中内聚力被激光能量破坏所导致。江国业等人^[9]利用半导体泵浦激光器(短脉冲激光器)对 X65 管线钢表面的环氧树脂漆进行激光清洗试验,分别研究了激光作用后的金属表面形貌、横截面微观组织、横截面硬度分布。研究发现:经过激光清洗后的试样表面会形成形状和分布均没有规律的微坑,微坑直径与光斑直径相吻合,且在截面发现形成了 10~20 μm 的带状区以及 90~100 μm 的裂纹区,激光清洗前后基底表面硬度并没有发生明显变化。杨嘉年等^[10]采用响应面的方法研究了激光功率、扫描次数、光斑搭接率这三个参数对激光清洗 304 不锈钢基体表面的丙烯酸聚氨酯漆的清洗效果,研究发现:当激光功率为 19.18 W,光斑搭接率为 46.06%,扫面次数为 3 次时,激光清洗的效果最好,且此时基体表面的粗糙度符合再次涂漆要求,表面 C 和 O 的含量也表面基底未收到损伤。郭召恒等^[11]为了研究纳秒脉冲激光对 HT250 铸铁表面的漆层去除后金属表面的影响规律,分析了激光清洗前后金属表面的微观形貌、含氧量、粗糙度。研究发现:随着激光功率的增大,除漆效率会逐渐提高,但是激光功率过大会使得基底表面粗糙度升高;当清洗速度减小时,试样表面的 O 元素含量增高,漆层去除机制由振动效应和烧蚀效应变为一烧蚀效应为主。最后得出当激光功率为 50 W、脉冲频率为 90 kHz、清洗速度为 7000 mm/s 时,除漆的效率最好,且不伤及金属基底。

虽然目前激光清洗在除漆方面的研究有很多,但是多以试验研究为主,很少有涉及到利用仿真模拟分析来提供更加精确的工艺参数指导。若是对于激光清洗比较精细的元器件等,单单利用试验研究相对来说难免会有较大的误差。所以,利用仿真数值模拟来更加精确的分析激光与材料的相互作用,研究激光作用时材料表面以及深度上的温度场分布

时非常关键的,且光斑搭接率对清洗效果的影响同样也是一个亟需研究的方面。

本文利用 COMSOL 软件建立了光纤脉冲激光清洗 5083 铝合金表面丙烯酸聚氨酯漆模型,探究了激光功率以及光斑搭接率对模型温度场以及清洗深度的影响,用以确定较为合适的激光参数,最后通过试验为对模拟结果进行验证,同时研究了激光清洗对铝合金表面粗糙度的影响,旨在为以后的光纤脉冲激光清洗提供理论指导以及工艺参数参考。

2 激光除漆的原理及理论模型

光纤脉冲激光除漆的过程理论上就是当脉冲激光辐照在漆层表面时,漆层以及基底都会吸收激光能量,形成激光与漆层以及基底之间的作用力,而当此作用力克服掉基底与漆层之间的粘附力时漆层脱落基底;或者是漆层吸收激光的能量导致漆层直接气化而实现除漆的过程。激光除漆主要包括振动效应以及烧蚀效应,振动效应是指基底以及漆层受到短时间的激光辐照之后都会发生形变,导致形变产生的热膨胀应力以及弹性应力大于漆层以及基底之间的粘附力,使得漆层脱离基底;烧蚀效应是指激光辐照在漆层表面,使得油漆温度达到自身的气化温度,导致漆层气化去除的效果^[12]。

如图 1 所示为光纤脉冲激光清洗铝合金表面漆层的示意图。激光通过光束调整系统对激光光束进行准直,随后通过扫描振镜进行往复扫描,然后利用聚焦镜聚焦后辐照到带清洗基材表面,进行激光清洗工作。而少量的能量会发生热对流以及热辐射而损失,其中激光的大部分能量都会在极短时间内被覆盖在铝合金表面的漆层吸收,使得漆层达到气化温度。

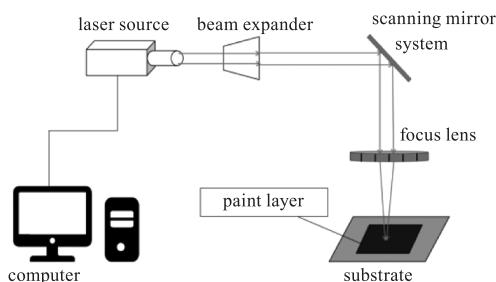
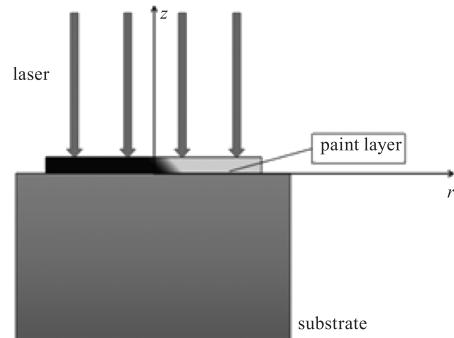


图 1 激光清洗原理示意图

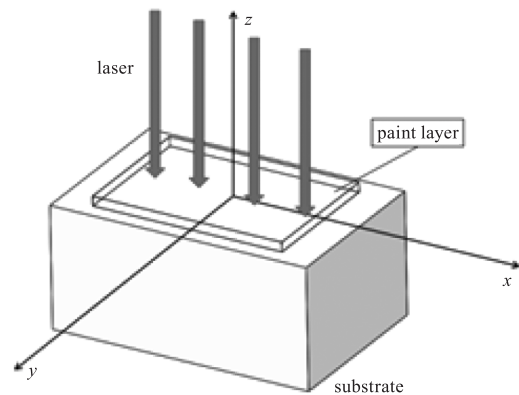
Fig. 1 Schematic diagram of laser cleaning principle

所以激光清洗实际上就是激光对于材料的烧蚀效应,其清洗模型如图 2 所示,空间坐标系以 $z = 0$

处的基底与漆层的接触面建立,基底表面漆层的厚度为 D_p ,基体自身的厚度为 D_s ,漆层的厚度 D_p 远远小于基底的厚度 D_s 。



(a) 空间坐标系图



(b) 平面坐标系图

图 2 激光清洗三维模型图

Fig. 2 3D model of laser cleaning

在光纤脉冲激光除漆试验中,脉冲激光的功率密度与时间和空间位置的变化有关,当初始入射的脉冲激光的功率密度为 I_0 时,高斯分布的脉冲激光表达式^[13]为:

$$I(r, t) = I_0 s(r) g(t) = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \frac{t}{\tau^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

式中, I_0 为入射激光起始的功率密度; $s(r)$ 与 $g(t)$ 为光纤脉冲光激光在时间和空间上的分布形式; τ 为脉冲激光函数的全峰脉宽。

在光纤脉冲激光除漆过程中,其热传导过程遵循傅里叶热传导定律,在空间坐标系下三维热传导控制方程^[14]为:

$$\frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \nabla^2 T(x, y, z) \quad (2)$$

式中, $\alpha_i = \frac{K}{\rho C}$ 表示热扩散率; K 为材料的导热率; C 为材料的比热容; ρ 为材料的密度; ∇^2 表示拉普拉

斯算子,如果温度场是稳定的,则温度不随时间的变化,则 $\nabla^2 T(x, y, z) = 0$ 。

脉冲激光在作用过程中符合高斯分布模型,故

$$I(x, y, z, t) = \begin{cases} \alpha P(\pi R^2 \tau)^{-1} \cdot \exp\left[-2 \frac{(x - vt)^2 - y^2}{R^2}\right] \cdot \exp\left[-2 \frac{(t - \tau)^2}{\tau^2}\right], (\gamma - 1)t_p < t < (\gamma - 1)t_p + \tau \\ 0, (\gamma - 1)t_p + \tau < t < \gamma t_p \end{cases} \quad (3)$$

当激光在一定区域内光斑为均匀分布,则在激光工作时间内,选取的脉冲激光平均功率密度恒定不变,得到温度随加工深度以及时间的变化的解析解^[16]为:

$$T(z, t) = \begin{cases} T_0 + \frac{2P(1-R)}{KS} \left\{ \sqrt{\alpha t} \cdot \text{ierfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}\right] \right\}, & t \leq t_p \\ -\frac{2P(1-R)}{KS} \left\{ \sqrt{\alpha t(t-t_p)} \cdot \text{ierfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{\alpha t(t-t_p)}}\right] \right\}, & t > t_p \end{cases} \quad (4)$$

式(3), (4)中, $I(x, y, z, t)$ 表示激光的峰值功率密度 (W/cm^2); t 为激光加载时间; P 为激光的峰值功率 (W); R 为光纤脉冲激光光斑半径 (cm); α 为材料热扩散率; τ 为光纤脉冲激光脉宽 (s); t_p 为脉冲激光周期 (s); γ 为大于 1 的整数; T_0 为材料的初始温度; S 为光斑面积。

因为在实际的激光除漆过程中,影响激光除漆的因素非常多,其中蕴含的物理化学变化繁多且杂,故在进行数值模拟中做出如下假设^[17-19]:

模型中的初始温度为环境温度,即:

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (5)$$

在模型中认为漆层以及铝合金基体表面是无限大的,所以在整个模型侧面没有热传导,所以系统侧部的边界条件为:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{x^2+y^2 \leq \infty} = 0 \quad (6)$$

在漆层与基体表面的接触面(即 $z=0$) 为理想接触面,有百分百的递效率,所以两面每时每刻均具有相同的温度,即:

$$T_s(x, y, z, t) = T_p(x, y, z, t) \quad (7)$$

激光加工深度越深,激光功率逐渐为 0,且激光加工所作用的温度逐渐消失,即

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\infty} = 0 \quad (8)$$

基底底部与入射光相反的背面假设为绝热条件,所以基底底面的边界条件为:

$$T_s(x, y, -D_s, t) = T_0 \quad (9)$$

当不考虑激光与试验材料之间的相互作用时,其本身的能量在时间以及空间上的符合正态分布模型,其正太分布的表达式^[15]为:

式中, D_s 为基体厚度。

3 数值模型

3.1 建立基体和漆层的模型

激光除漆的铝合金—漆层模型如图 3 所示,基体采用 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 5083 铝合金,铝合金表面漆层为 $100 \mu\text{m}$ 的丙烯酸聚氨酯漆,为了在模拟中显示激光清洗过程中温度场的精确的变化,对基体—漆层模型进行了网格划分,其中,漆层模型的网格划分比铝合金基体模型的网格划分要细得多,且在漆层划分中,由于脉冲激光作用于表面之后的温度场梯度较大,在非常小的区域内温度的变化可能会非常大,所以在漆层被激光作用的区域内,要把网格划分得更细致,中间那部分黑色就是网格划分密集显现出来的,用以更好得观察激光清洗过程中温度场与位移场的同步可视化分析^[20]。

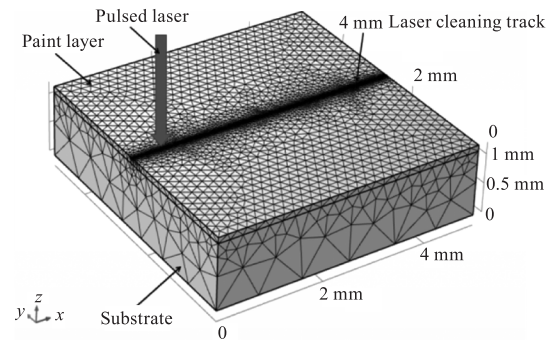


图 3 铝合金基底以及漆层的有限元模型以及网格划分

Fig. 3 Finite element model and mesh generation of aluminum alloy substrate and paint

在数值模拟过程中 5083 铝合金以及丙烯酸聚氨酯漆得热物性参数如表 1 所示。

3.2 光纤脉冲激光除漆模拟

建立光纤脉冲激光清洗 5083 铝合金表面丙烯酸聚氨酯漆层的模型,来研究清洗时温度场与清洗深度的瞬态可视化分析。

3.2.1 激光功率对温度场分布的影响

在模拟试验中,激光垂直的辐照在基体—漆层表面,并沿着 x 正方向进行高速移动,对激光清洗过

后的温度场进行瞬态分析,设置好脉冲激光的时间步,使得脉冲激光间隔一小段时间就往 x 轴正方向前进一步,进而形成清洗表面的温度场。

表 1 丙烯酸聚氨酯漆和 5083 铝合金热物性参数表

Tab. 1 Thermophysical parameters of Acrylic Polyurethane and 5083 aluminum alloy

Parameter	Acrylic polyurethane	5083 aluminum alloy
Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1062	2680
Specific heat/($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$)	2152.8	947
Heat conductivity/($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	0.192	156
Melting point/ $^\circ\text{C}$	125	570 ~ 640
Boiling point/ $^\circ\text{C}$	141.5	

参考以往的激光除漆试验参数,先分别设置脉冲激光的功率为 10 W、20 W、30 W、40 W,光斑直径均为 $50 \mu\text{m}$,激光重复频率为 100 kHz,光斑搭接率设置为 50%,根据激光能量密度公式^[21]:

$$\phi = \frac{4P}{f\pi D^2} \quad (10)$$

可计算出激光能量密度 ϕ 在 f 与 D 一定时与 P 呈正相关。其中, ϕ 为激光能量密度(J/cm^2); P 为激光平均功率(W); f 为脉冲激光重复频率(kHz); D 为光斑直径(cm)。所以在一定条件下,研究激光能量密度对温度场分布的影响相当于研究激光功率对温度场分布的影响。

故在相同时间内,上述四种不同功率的脉冲激光对基体表面漆层的温度分布影响如图 4 所示。

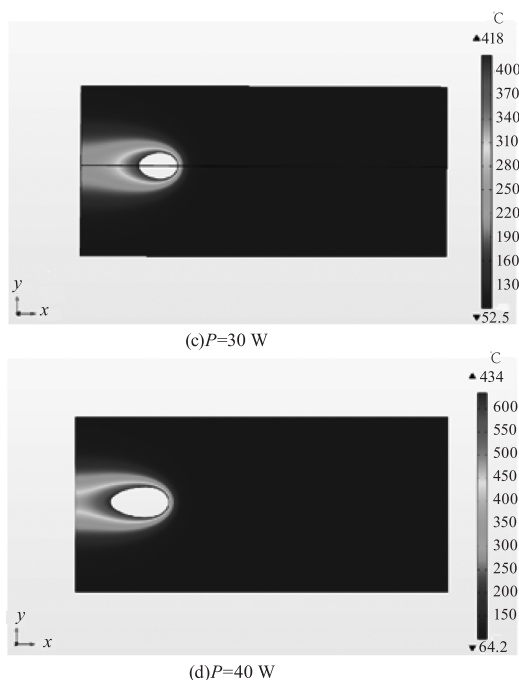
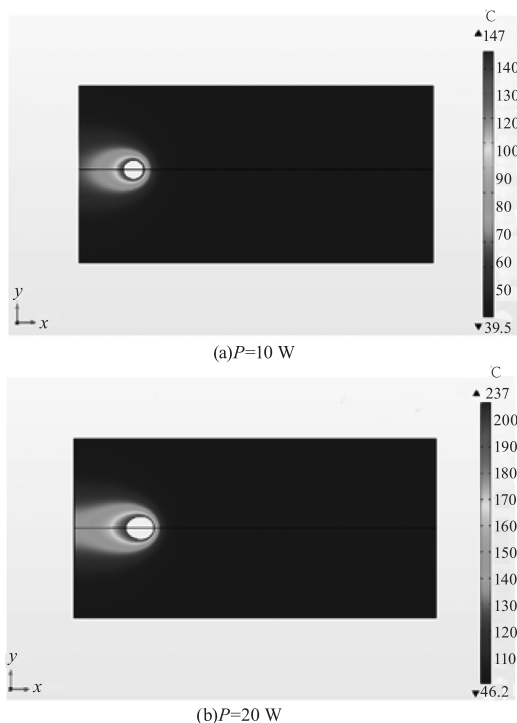


图 4 相同时间内不同的激光功率对漆层表面温度分布的影响
Fig. 4 The influence of different laser powers on the surface temperature distribution of the paint layer in the same time

从图中 4 可以看到,激光在扫过丙烯酸聚氨酯漆过后,会在漆层表面留下一层清洗轨迹,在清洗轨迹中可以看到温度场分布属于高斯型分布,且越靠近脉冲激光光斑中心,温度越高,越靠近光斑边缘,温度越低。且随着激光功率的升高,漆层表面扫面路径上残留脉冲尚未冷却的温度场的温度越高。

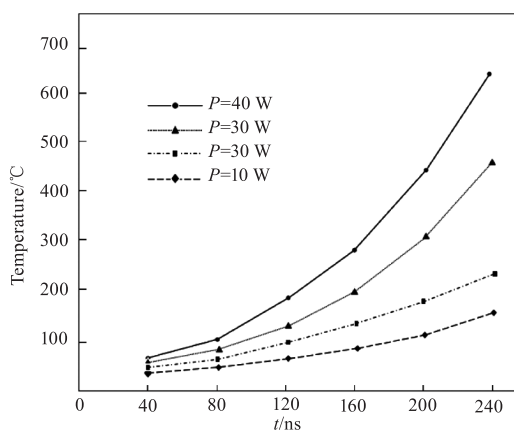


图 5 相同时间内不同激光功率对漆层温度的影响
Fig. 5 The influence of different laser power on the temperature of paint coating in the same time

如图 5 所示为漆层温度在不同激光功率下随激光作用时间的变化。可以看出随着激光功率的增加,相同时间内漆层的升温速度也就越大。在激光

功率为 40 W 时,温度在脉冲时间结束时达到最高,此时温度为 634 °C。而在激光功率为 10 W 时,温度升高的最慢,且最高温度为 147 °C。由此可见,随着激光功率的增加,漆层表面的升温速率也会随之增大,且能够达到的最高温度也就越高。

3.2.2 激光功率对清洗深度的影响

在脉冲激光清洗试验中,激光器以一个接一个的光斑辐照在待清洗基体表面,光斑是由于激光脉冲形成的,而对于激光对基体的清洗深度也是由于单个脉冲的能量密度所决定的。由激光能量密度公式可以得出当脉冲频率一定时,激光的平均功率越大,则单个脉冲能量密度也就越大,清洗深度就会越深。

如图 6 所示为激光平均功率分别为 10 W, 20 W, 30 W, 40 W, 脉冲频率为 100 kHz 时激光清洗铝合金表面漆层的深度以及截面处的温度场分布。由图可见,当激光功率为 10 W 时,覆盖在铝合金表面的丙烯酸聚氨酯漆层并没有完全被去除掉,仍然有少许的漆层覆盖在基体表面;当激光功率为 20 W 时,脉冲激光基本上能够把基体表面的漆层去除,但是清洗深度只是刚好达到基体表面,烧蚀的坑周围还有许多漆层材料,还不能达到很好的除漆效果;当激光功率为 30 W 时,脉冲激光已经能很好的去除掉基体表面的漆层材料,并且对铝合金基体有少许的烧蚀作用,烧蚀的深度约为 10 μm ,达到了比较好的清洗效果;当激光功率为 40 W 时,脉冲激光由于功率过大,在完全去除掉基体表面的漆层材料的同时也对基体表面造成了比较大的损伤,基体被烧蚀的深度达到 40 μm 。所以对根据激光功率对清洗深度深度的研究可以得出,当激光功率增大时,脉冲激光可以逐渐清除掉基体表面的漆层才材料,当漆层材料会被去除尽数去除,达到完美的清洗效果,而随着功率的继续增大,会使得基体表面受到激光辐照而被损伤,形成微坑。

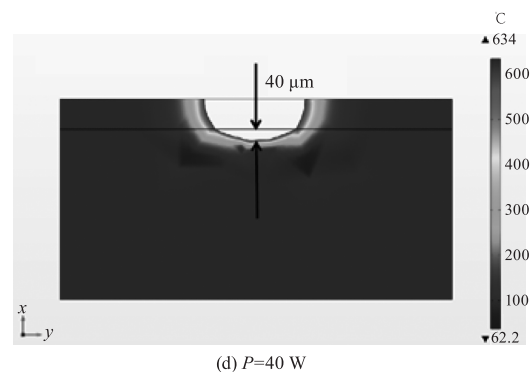
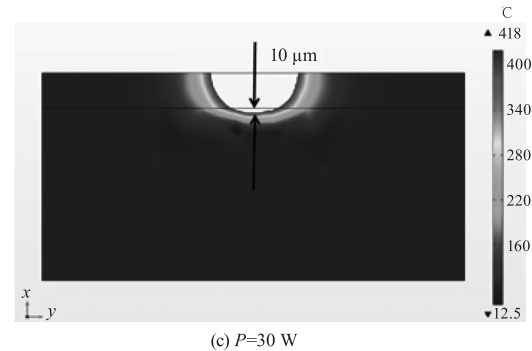
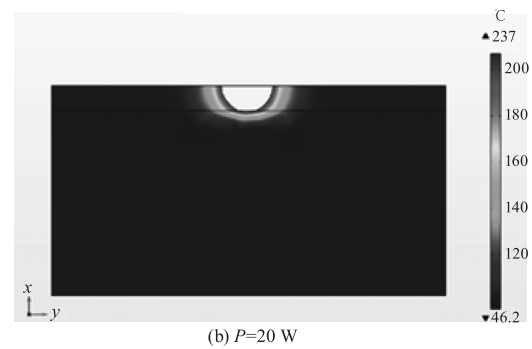
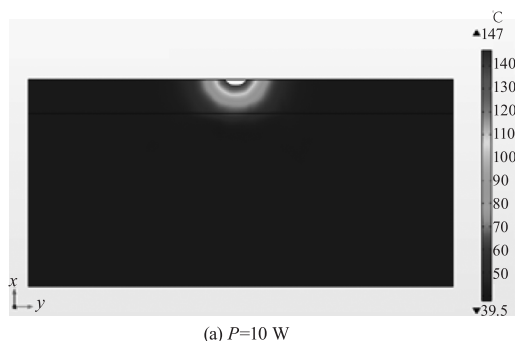


图 6 不同功率下的清洗深度

Fig. 6 Cleaning depth at different power

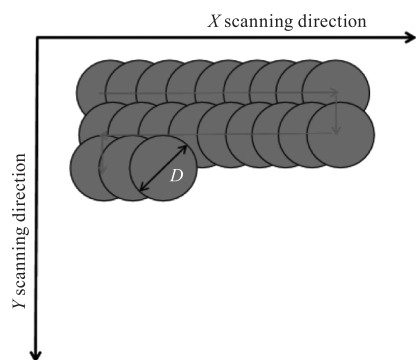
3.2.3 光斑搭接率对清洗效率的影响

在脉冲激光工作时,会在试样表面留下一条清洗轨迹,这条轨迹是由许多脉冲点形成的,这是由于在激光光束调节系统中的振镜的作用下,使得激光脉冲朝着一定的方向进行移动,脉冲激光在 X 振镜作用下朝着 X 方向移动,当 X 方向的一条扫描线移动到边缘之后, Y 振镜会使得点脉冲偏折,会在空间上形成另一条与上一条平行的扫描线,如此循环往复,形成清洗面。而对于脉冲激光来说,所形成的脉冲光斑为准高斯型,光斑中间部分能量集中,较为均匀,光斑边缘部分能量较为稀疏,所以各光斑之间需要一定的重合来互相弥补光斑边缘稀疏的能量才能有效的实现激光清洗工作,而这些重合部分的多少就是光斑搭接率。因此,找到一个合适的光斑搭接率对清洗效率而言显得尤为重要。

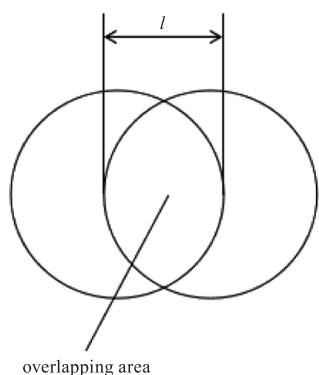
如图 7(a) 为激光清洗轨迹示意图,图 7(b) 为激光光斑之间的搭接示意图。激光光斑直径为 D , 搭接长度为 l , 则搭接率:

$$\eta = \frac{l}{D} \quad (11)$$

即当 $l = D$ 时, 各光斑之间完全重合, 搭接率为 100%, 激光不予移动; 当 $l = 0$ 时, 光斑之间的边缘正好接触且完全没有重合部分, 此时搭接率为 0%。



(a) 激光清洗轨迹



(b) 激光光斑之间搭接示意图

图 7 光斑排列图

Fig. 7 Laser spot diagram

为了更好地体现出光斑搭接率对清洗效果的影响, 利用如图 8 所示方向的截面图来进行模拟研究, 即截面图为 $y = 2.5 \text{ mm}$ 的 xz 平面图。

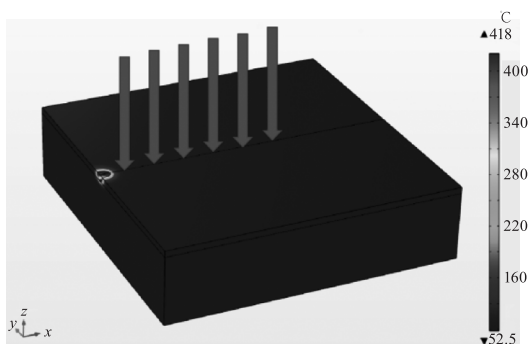
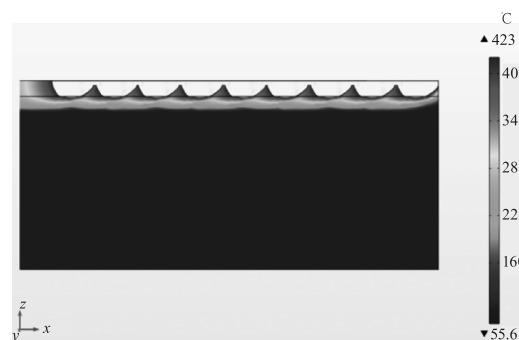


图 8 $y = 2.5 \text{ mm}$ 的 xz 平面图的截取方向

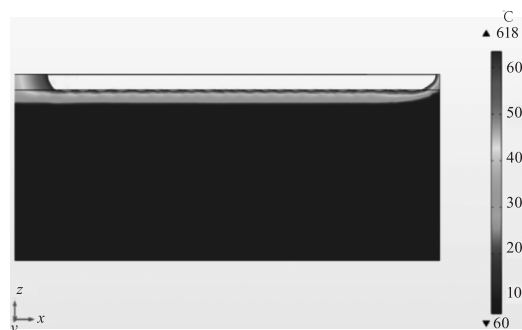
Fig. 8 Intercept direction of xz plane graph with $y = 2.5 \text{ mm}$

根据上述模拟结果, 在进行光斑搭接率的研究过程中选择激光功率为 30 W, 激光脉冲频率选择 100 kHz。从图中 9(a) 可以看出, 当脉冲激光的搭接率为 0 时, 激光在移动过程中对漆层表面所烧蚀的微坑之间仍然有很多多余的漆层, 这是因为在清洗过程中激光对漆层的热累积效应不够, 导致了微坑之间的漆层材料没有受到激光辐照的影响, 所以这个区域的漆层并没有被激光烧蚀掉, 且在此光斑搭接率下试样表面的最高温度为 $423 \text{ }^\circ\text{C}$, 这样并没有达到预期的清洗效果。而如图 9(b) 中可以看出, 当脉冲激光的光斑搭接率为 50% 时, 激光的扫描速度很慢, 从而使得脉冲激光辐照在漆层表面的温度场叠加而形成一条与完整的清洗路径, 热累积效应增加, 且不存在未被辐照到的漆层, 热影响区域大大增加, 清洗表面光滑完整。

且由图可知材料的最高温度为 $618 \text{ }^\circ\text{C}$, 已经达到了漆层材料的气化温度, 可以有效的去除漆层材料。



(a) 光斑搭接率为 0%



(b) 光斑搭接率为 50%

图 9 不同光斑搭接率情况下的清洗效果

Fig. 9 The cleaning effect of different spot overlapping ratio

当激光功率选取为 30 W 时, 漆层表面以及铝合金基体表面的温度随着光斑搭接率的变化如图所示。由图 10 中可以看出, 当脉冲激光的光斑搭接率大于 50% 时, 两者的最高温度随着光斑搭接率的增大而明显的升高, 原因是当脉冲激光的光斑搭接率

较大时,有一部分基体表面的区域同时受到两个脉冲激光叠加辐照,使得在漆层表面引起的热累积效应随之增加,漆层表面和基体表面的温度也随之增加。而随着光斑搭接率的继续增加到 50 % 以上时,试样表面的温度会继续增加,热累积效应会使得温度提高到超过铝合金基体的熔点,进而损坏基体,而 50 % 的搭接率已经可以去除全部的漆层材料。

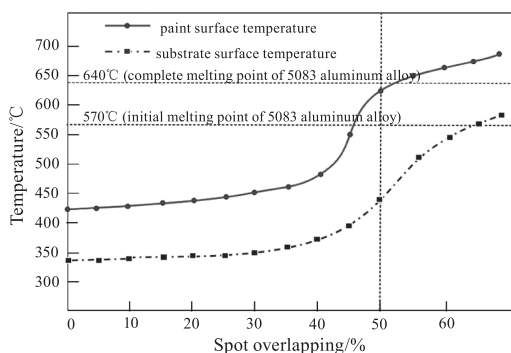


图 10 漆层和基体表面最高温度随光斑搭接率的变化

Fig. 10 Variation of surface temperature of paint layer and substrate with spot overlapping

4 激光除漆实验及结果分析

为了验证仿真结果的真实性,本课题采用由 IPG 公司生产 YLP-HP-1-100-100-100 型光纤激光器,输出光纤脉冲激光对 5083 铝合金进行激光清洗试验。激光清洗设备整机光纤脉冲激光器、专业水冷机、传导光纤、激光扫描振镜和场镜等光学系统多个结构组成,可装置于运动平台、机器人等运动机构,实现稳定自动化清洗,具有清洗效率高、效果好、清洗对象广泛等设备特点,具体试验参数如表 2 所示。铝合金试样采用的尺寸为 5 mm × 5 mm × 1 mm 的 5083 铝合金基体,漆层采用丙烯酸聚氨酯漆,在基体表面涂覆厚度为 100 μm。根据上述光纤脉冲激光对铝合金基体清洗的模拟研究,试验采用光斑搭接率为 50 %,光斑直径为 50 μm,激光功率选择 10 ~ 40 W,激光重复频率选择为 100 kHz。

4.1 激光清洗后的微观形貌分析

为了观察激光清洗之后的基体表面的微观形貌,先采用 EMPA-8050G 电子探针显微分析仪对激光清洗之后的试样进行观察,其形貌如图 11 所示。可以看出,在脉冲激光清洗之后,试样表面会形成一道道熔融状态下的火山坑,且火山坑的直径约 50 μm,这是由于符合高斯热源分布的脉冲激光的中心温度较高,边缘温度较低而形成的微坑。采用日本基恩士公司生产的 VK-X200K 型号的激光共聚

焦显微镜对清洗之后的铝合金基体表面进行表面观察。

表 2 激光清洗设备技术参数表

Tab. 2 Technical parameters of laser cleaning equipment

Parameter	Value
Wavelength/nm	1064
Laser power/W	≤100
Pulse width/ns	100
Frequency/kHz	≤100
Scan speed/(mm/s)	≤8000
Spot diameter/mm	50
Spot shape	Circle

随后在共聚焦显微镜观察下,激光功率从 10 W 增加至 40 W,激光对基体表面的影响越来越大,其微观形貌如图 12 所示。

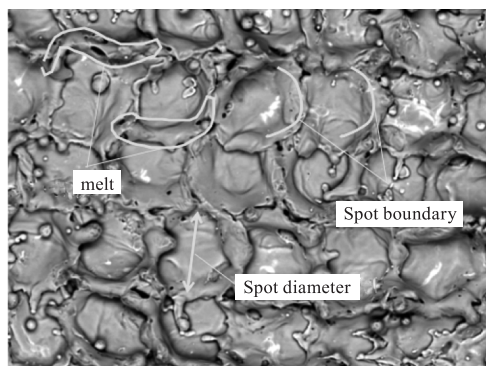


图 11 激光清洗之后铝合金基体表面的 EMPA 图

Fig. 11 EMPA of aluminum alloy substrate surface after melt laser cleaning

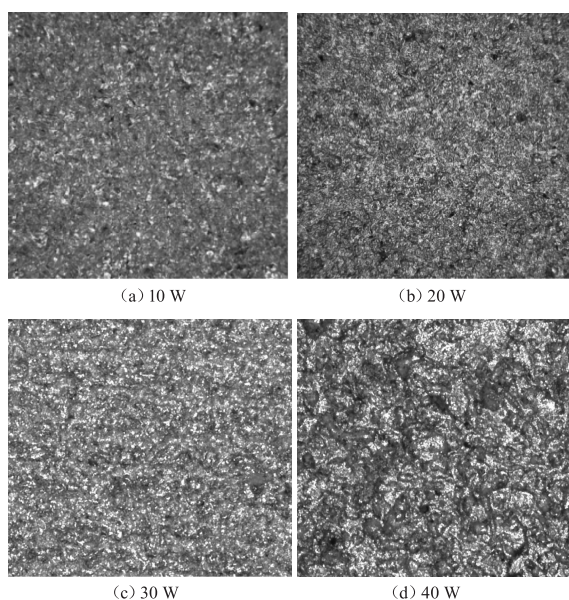


图 12 不同功率的激光的清洗铝合金基体表面的微观形貌

Fig. 12 Morphology of aluminum alloy substrate surface cleaned by laser with different power

从图 12 中可以看出:当激光功率为 10 W 时,铝合金基体表面并没有非常明显的变化,涂覆在表面的丙烯酸聚氨酯漆依然比较完整的覆盖在表面,整体来看和激光清洗之前没有发生比较明显的变化,和原始的基材形貌相似;当激光功率为 20 W 时,可以在激光扫描的路径上看到少许的微坑,这是由于激光聚焦在基体表面而发生烧蚀效应形成的熔融的微坑,这是由于光纤脉冲激光的聚焦处高斯热源中心的温度虽然使得铝合金基体表面的漆层达到气化温度,但是由于功率较低,导致基体表面漆层并没有被很好的去除,绝大多数漆层依然停留在基体表面,没有被烧蚀掉。所以此时的清洗效果并没有达到比较好的状态;当激光功率为 30 W 时,从图中可以看出,铝合金表面漆层已经呈现出完全熔融状态,铝合金基底的银白色已经开始显露出来,这是由于激光功率的增大使得漆层材料已经达到了气化温度,且使得漆层尽数气化,且温度接近于铝合金基体的熔点,此时清洗效果最好,且未伤及铝合金基体表面。当激光功率达到 40 W 时,试样表面呈现出大量熔融状态的微坑,铝合金表面被激光烧蚀而显现出的微坑和熔融状态下的漆层材料杂糅在一起,使得试样表面变得凹凸不平,铝合金表面在此激光功率下已经受到损坏。

4.2 表面粗糙度

优先利用共聚焦显微镜对清洗之后的试样表面进行观测,随后再采用表面粗糙度仪进行测量,为了保证测量结果数据的准确性,对每个试样表面的两个垂直方向分别测量 3 次,然后取 6 次测量的平均值作为表面粗糙度 Ra 的值。在完成经过激光清洗之后的试样的粗糙度测试之后,再与未经过激光清洗的试样表面粗糙度进行对比,数值如表 3 所示,曲线图及微观形貌如图 13 所示。

表 3 不同功率的激光清洗前后基材表面的粗糙度

Tab. 3 Surface roughness of substrate before and after laser cleaning with different power

Laser power/W	10	20	30	40
Surface roughness before cleaning/ μm	7.56	6.64	7.32	7.96
Surface roughness after cleaning/ μm	8.32	5.56	4.48	9.57

由图 13 中可以看出,随着激光功率的增大,试样表面的粗糙度呈现出先减小后增大的变化趋势。这是由于当脉冲频率一定时,激光的平均功率越大,

则单个脉冲能量密度也就越大。当激光功率为 10 W 时,激光没有触及到铝合金基体表面,激光单纯地在漆层材料表面烧蚀出一个个火山微坑,导致试样表面的粗糙度较未清洗时有所增加;当激光功率为 20 W 时,激光刚好烧蚀到基体表面,基体表面地漆层基本上被烧蚀殆尽,但是仍然有少许的漆层材料停留在铝合金基体表面,此时粗糙度较未清洗时低;当激光功率为 30 W 时,漆层材料已经被完全烧蚀干净,且在 50 % 的光斑搭接率下,由于激光能量的叠加作用使得基体表面被激光完整的烧蚀掉约 $10\ \mu\text{m}$ 的厚度,在此激光功率的烧蚀下,烧蚀过的痕迹光滑,粗糙度达到最低;当激光功率为 40 W 时,不仅漆层材料被烧蚀殆尽,由于铝合金基体的熔融温度与漆层材料的气化温度相差较大,激光把漆层烧蚀完毕之后多余的能量在 50 % 的光斑搭接率下叠加在基体表面,使得基体表面开始出现熔融现象,且光斑直径远小于 $50\ \mu\text{m}$,铝合金基体表面被损坏,粗糙度反而增加到最高。

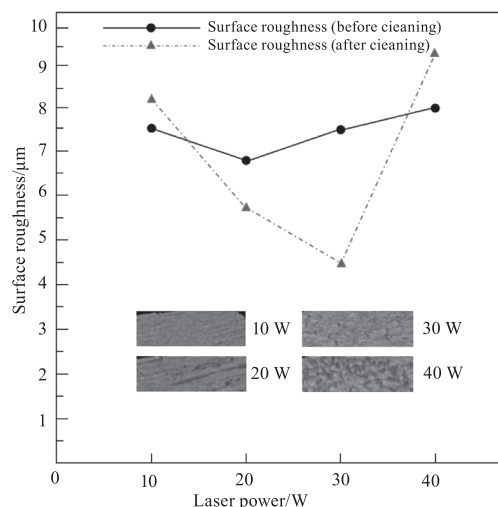


图 13 不同功率的激光清洗前后基材表面的粗糙度

Fig. 13 Surface roughness of substrate before and after laser cleaning with different power

从上述实验可得:当激光重复频率一定时,激光的功率逐渐加大会导致试样表面的粗糙度先增大然后减小然后再增大的趋势,在激光功率为 30 W 的时候除漆效果最好,且不损坏基体表面,表面粗糙度达到最低为 $4.48\ \mu\text{m}$ 。实验结果与模拟结果大致相同,从而证明了数值模拟的准确性。

5 结论

综上所述,金属表面激光除漆技术时激光清洗领域中的一重要分支,有着广阔的发展前景。文

中利用 COMSOL 软件建立了光纤脉冲激光清洗 5083 铝合金表面丙烯酸聚氨酯漆模型,模拟了脉冲激光在清洗工件时工件表面的温度场模型,分析了不同功率参数下的脉冲激光对工件的清洗深度的影响,并且完成了光斑搭接率对清洗效果的可视化分析。将有限元模拟的结果与激光清洗试样之后的表面质量作比较分析,结果发现:当脉冲激光的重复频率以及光斑直径一定时,激光功率以及光斑搭接率共同决定清洗效果,其中功率越大,清洗深度越大,但是功率过大会导致铝合金基体表面受到激光辐照的作用而受到损坏,激光功率为 30 W 时,漆层材料被完全去除,铝合金表面的去除深度为 10 μm ;光斑搭接率越小,激光辐照在试样表面的热累计效应越低,清洗效率越低,当光斑搭接率为 50 % 时,清洗效果最为合适。通过模拟结果与实验结果的对比研究可得出,当光纤脉冲激光的光斑直径以及重复率一定时,使用激光功率为 30 W,光斑搭接率为 50 % 时,可以完全去除漆层材料且不伤及基体,且经过此及激光参数清洗之后的试样表面粗糙度较清洗前降低,为 4.48 μm 。

参考文献:

- [1] B Main, L Molent, R Singh, et al. Fatigue crack growth lessons from thirty-five years of the Royal Australian Air Force F/A-18 A/B Hornet Aircraft Structural Integrity Program[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 133: 105426. 1 – 105426. 10.
- [2] Liu Pengfei, Wang Sijie, Yin Fengshi, et al. Process and mechanism of laser paint removal on the surface of 2024 aluminum alloy [J]. Materials Review, 2020, 34 (24): 24121 – 24126. (in Chinese)
刘鹏飞,王思捷,殷凤仕,等. 2024 铝合金表面激光除漆工艺及机理 [J]. 材料导报, 2020, 34 (24): 24121 – 24126.
- [3] Wan Zhuang, Yang Xiefeng, Xia Guofeng, et al. Application and prospect of laser cleaning technology [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2020, 48 (7): 172 – 178. (in Chinese)
万壮,杨学锋,夏国峰,等. 激光清洗技术的应用及展望[J]. 机床与液压, 2020, 48 (7): 172 – 178.
- [4] Wang Zemin, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. The development status and prospects of laser cleaning technology [J]. Laser Technology, 2000, (2): 68 – 73. (in Chinese)
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, (2): 68 – 73.
- [5] Shi Shudong. Theoretical model, numerical calculation and application research of pulsed laser paint removal [D]. Tianjin: Nankai University, 2012. (in Chinese)
施曙东. 脉冲激光除漆的理论模型、数值计算与应用研究[D]. 天津:南开大学, 2012.
- [6] Yuan Quan, Qiu Yuan, Liu Yang, et al. Application research on laser cleaning of aluminum alloy paint and oxide layer [J]. Plating & Finishing, 2019, 41 (12): 25 – 29. (in Chinese)
元泉,邱媛,刘洋,张骆. 铝合金漆层与氧化层激光清洗应用研究[J]. 电镀与精饰, 2019, 41 (12): 25 – 29.
- [7] Yuvraj K M, Suvradip M, Dinesh K S, et al. Effect of laser operating mode in paint removal with a fiber laser [J]. Applied Surface Science, 2013, 264 (1): 892 – 901.
- [8] Zhao Haichao, Qiao Yulin, Du Xian, et al. Study on the technology of pulsed laser cleaning the surface paint of aluminum alloy [J]. China Laser, 2021, 48 (6): 246 – 259. (in Chinese)
赵海朝,乔玉林,杜娴,等. 脉冲激光清洗铝合金表面漆层的技术研究 [J]. 中国激光, 2021, 48 (6): 246 – 259.
- [9] Jiang Guoye, Lei Pu, Liu Yuping, et al. The influence of laser paint removal for oil and gas pipelines on the structure and hardness of the substrate [J]. China Laser, 2020, 47 (3): 167 – 174. (in Chinese)
江国业,雷璞,刘宇平,等. 油气管道激光除漆对基材组织和硬度的影响 [J]. 中国激光, 2020, 47 (3): 167 – 174.
- [10] Yang Jianian, Zhou Jianzhong, Sun Qi, et al. Optimization of laser paint removal process parameters based on response surface analysis [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2019, 56 (23): 190 – 197. (in Chinese)
杨嘉年,周建忠,孙奇,等. 基于响应面分析的激光除漆工艺参数优化 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56 (23): 190 – 197.
- [11] Guo Zhaoheng, Zhou Jianzhong, Meng Xuankai, et al. Research on HT250 gray cast iron nanosecond pulsed laser paint removal process [J]. China Laser, 2019, 46 (10): 191 – 197. (in Chinese)
郭召恒,周建忠,孟宪凯,等. HT250 灰铸铁纳秒脉冲激光除漆工艺研究 [J]. 中国激光, 2019, 46 (10): 191 – 197.
- [12] Khairul M, Razab A, Jaafar M S, et al. Estimation of

- threshold fluence, absorption coefficient and thermal loading of car coated substrate in laser paint removal[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 54: 439 - 443.
- [13] Shi Shudong, Du Peng, Li Wei, et al. Research on quasi-continuous laser paint removal at 1064 nm[J]. China Laser, 2012, 39(9): 63 - 69. (in Chinese)
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): 63 - 69.
- [14] Li Y Y, Zeng B W, Lin L. Modeling and simulation of laser cleaning of tapered micro-slots with different temporal pulses[J]. Optics and Laser Technology, 2013, 45.
- [15] Gao Liaoyuan, Zhou Jianzhong, Sun Qi, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser cleaning aluminum Salloy paint layer[J]. China Laser, 2019, 46(5): 335 - 343. (in Chinese)
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): 335 - 343.
- [16] Aniruddha K, Mool C G. Surface preparation of Ti-3Al-2.5 V alloy tubes for welding using a fiber laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(11): 1259 - 1265.
- [17] Chen Xuejiao, Guo Lianhong, Zeng Peng. Two alternative results of heat conduction equation on three unbounded regions[J]. Journal of Hainan University: Natural Science Edition, 2020, 38(4): 309 - 317. (in Chinese)
陈雪皎, 郭连红, 曾鹏. 热传导方程在 3 种无界区域上的二择一结果[J]. 海南大学学报: 自然科学版, 2020, 38(4): 309 - 317.
- [18] Xu Kang, Ren Hengfei, Ren Jinlian, et al. The Application of pure meshless parallel computing in the numerical simulation of heat transfer equation[J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2019, 57(6): 1372 - 1378. (in Chinese)
胥康, 任恒飞, 任金莲, 等. 纯无网格并行计算在传热方程数值模拟中的应用[J]. 吉林大学学报: 理学版, 2019, 57(6): 1372 - 1378.
- [19] Li Yushan. The numerical solution of a moving boundary problem of a heat conduction equation[J]. Journal of Shangqiu Teachers College, 2012, 28(12): 23 - 29. (in Chinese)
李玉山. 一类热传导方程移动边界问题的数值求解[J]. 商丘师范学院学报, 2012, 28(12): 23 - 29.
- [20] Zhou Guilian, Kong Lingbing, Sun Haiying. Finite element analysis of temperature field of laser cleaning mold surface based on ANSYS[J]. Manufacturing Automation, 2008(9): 90 - 92. (in Chinese)
周桂莲, 孔令兵, 孙海迎. 基于 ANSYS 的激光清洗模具表面温度场有限元分析[J]. 制造业自动化, 2008(9): 90 - 92.
- [21] Nie Jinhao, Yang Yixin, Li Yuxin, et al. The influence of laser energy density on the microstructure and properties of laser cladding NiCoCrAlY coating[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(5): 1083 - 1091. (in Chinese)
聂金浩, 杨宜鑫, 李玉新, 等. 激光能量密度对激光熔覆 NiCoCrAlY 涂层组织与性能的影响[J]. 兵工学报, 2021, 42(5): 1083 - 1091.