

基于 COMSOL 的激光清洗 2219 铝合金漆层工艺研究

胡少武,王涛,黄旭东,姚涛,苗润芃,康清川,张译之
(河北工业大学机械工程学院,天津 300401)

摘要:利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件,建立 2219 铝合金板表面环氧聚酰胺底漆有限元模型,并在其表面加载经典高斯脉冲热源模拟激光清洗过程。探究了清洗参数的变化对漆层温度场、不同漆层厚度清洗效果及烧蚀深度的影响,通过对仿真结果分析发现,当重复频率为 25 kHz,功率 20 W 时,在不损伤铝合金基体的前提下,搭接率 50 % 和 60 % 均能够完全清除环氧聚酰胺底漆。使用型号 CETC26thPEL 脉冲光纤激光器对实物进行清洗,并利用超景深显微镜观察材料表面微观形貌,发现当能量密度为 22.94 J/cm^2 时,清洗过程中会损伤铝合金基体,搭接率为 70 % 会使得材料表面的粗糙度增大影响涂装性能,研究结果为激光清洗高强度铝合金漆层提供一定的理论与实验基础。

关键词:激光清洗;COMSOL Multiphysics;搭接率;微观形貌

中图分类号:TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2022.07.004

Study on laser cleaning technology of 2219 aluminum alloy paint layer based on COMSOL

HU Shao-wu, WANG Tao, HUANG Xu-dong, YAO Tao, MIAO Run-peng, KANG Qing-chuan, ZHANG Yi-zhi
(College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The finite element model of epoxy polyamide primer on 2219 aluminum alloy plate is established by using COMSOL Multiphysics simulation software, and the laser cleaning process is simulated by loading classical Gaussian pulse heat source on the surface. The influence of the change of cleaning parameters on the temperature field, the cleaning effect of different coating thickness and the ablation depth is explored. Through the analysis of the simulation results, it was found that when the repetition frequency was 25 kHz and the power was 20 W, the epoxy polyamide primer could be completely removed with the lap rate of 50 % and 60 % under the premise of not damaging the aluminum matrix. The CETC26thPEL pulse fiber laser was used to clean the material, and the ultra depth of field 3D microscope was used to observe the microstructure of the material surface. It was found that when the energy density was 22.94 J/cm^2 , the aluminum alloy matrix would be damaged during the cleaning process, and the lap rate was 70 %, which would increase the roughness of the material surface and affect the coating performance. The results provide a theoretical and experimental basis for laser cleaning of high strength aluminum alloy coatings.

Keywords: laser cleaning; COMSOL Multiphysics; lap rate; microstructure

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51775166)资助。

作者简介:胡少武(1996-),男,硕士研究生,主要从事激光加工的研究。E-mail:1352607160@qq.com

通讯作者:王涛(1963-),男,博士,教授,硕士生导师,研究方向为光机电一体化,激光在光通讯中的应用,激光加工的应用。E-mail:wtao_1@163.com

收稿日期:2021-06-26

1 引言

近些年激光加工作为特种加工技术其应用极为广泛,例如激光抛光、激光清洗、激光增材、激光焊接等等。其中激光清洗近些年来发展速度迅猛,不同与传统清洗,激光清洗过程产生的噪声小,无污染,而且可以实现自动清洗,清洗的精度高,因此是一种高效、绿色的清洗技术^[1-2]。

2219 铝合金具有优异的综合性能,如良好的加工性能、高的比强度,抗腐蚀性能以及较高的韧性,被认为是航空航天工业中最具有应用前景的轻质高强度结构材料,广泛应用于液体火箭推进器贮箱以储存液体燃料^[3]。实际使用过程中为了提高其使用寿命,通常会在表面进行涂漆处理,同时为了保证其运行过程中的可靠性,需要定期对其进行重新涂装,激光清洗技术能够在不破坏基体的前提下,方便快捷地清除漆层。

目前一些学者通过有限元分析的方式对激光清洗漆层过程进行数值模拟,并对其加工机理和工艺参数进行优化。刘彩飞^[4]等为了研究脉冲激光去除金属表面漆膜的过程,建立了有限元模型,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,通过改变激光参量研究其对温度场的影响,并且做了相关的对比实验。高辽远、周建忠^[5]等在 COMSOL Multiphysics 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。邱文太^[6]等通过改变激光的脉冲频率和脉冲宽度对 2024 铝合金表面的环氧基底漆涂层进行清洗,探讨了不同激光参数下除漆效果以及基材表面损伤情况。江苏大学的郭召恒^[7-8]使用 ANSYS 有限元分析软件,建立纳秒脉冲激光除漆的有限元模型。模拟高斯热源作用下漆层的温度场分布,研究不同激光参数下温度场的变化规律,发现了相对于光斑直径为 50 μm 的载荷,光斑直径为 100 μm 的情况下虽然峰值温度有所下降但仍能达到清洗漆层的气化温度。Mateo^[9]等发现设置合理的激光能量密度能有效地清除黄铜艺术品修复剂中的油漆。Tianyi Shi^[10]等使用 120 W MOPA 脉冲光纤激光器能够很好清洗铝合金表面氧化膜,有效地提高了铝合金拉伸和弯曲的力学性能。Ze-

Tian^[11]等在采用纳秒(30 ns)脉冲光纤激光清洗技术,通过改变能量密度(1.38 ~ 5.52 J/cm^2)去除了铝合金表面厚度为(61.7 \pm 26.5) μm 的天然海洋微生物污染。周桂莲^[12]利用 ANSYS 软件模拟了激光清洗模具过程中模具表面的温度变化,在分析过程中采用二维单元,并考虑了材料的热物性参数随着温度的变化,建立了有限元模型,得出了模具表面节点的温度分布,以及激光功率和扫描速度对温度场的影响。

上述研究只是模拟了激光清洗的温度场,并没有研究激光参数对油漆的不同厚度层温度的影响。为了探究实际过程温度的变化如何影响清洗效果,本文将 2219 铝合金基材和环氧聚酰胺底漆作为材料,通过 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件,模拟激光束照射漆层表面,通过改变光斑搭接率和能量密度,观察其对温度场分布的影响,由于单一的通过温度高低来判断清洗效果好坏会存在着一定误差,为了增强其结果的真实性,还研究了其对烧蚀深度的影响。之后使用纳秒脉冲光纤激光器对其实物进行清洗,通过观察清洗材料的表面微观形貌来探究实际的清洗效果,从而为激光清洗高强度 2219 铝合金漆层提供一定的理论与实验基础。

2 基于 COMSOL 的有限元分析

2.1 有限元模型假设

当激光热源作用在铝合金漆面上时,由于存在热量辐射和对流的情况,导致部分能量损失,这里为了简化模型保证实验的可行性,需要对所建立的模型进行假设:

- (1) 使用的热源是与激光能量分布相同的热源模型;
- (2) 清洗的材料是各向同性,且不会由于清洗的时间的变化对其性质产生影响;
- (3) 不考虑在加工时由于温度过高导致材料表面出现变形对实验结果的影响;
- (4) 基材与被清洗材料之间完全热传导;
- (5) 忽略温度改变对于材料热物性的影响;
- (6) 不考虑在加工时由于温度过高导致材料表面出现变形对实验结果的影响。

基于上述假设,遵守能量守恒原则,列出材料的热传导微分方程:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_m}{c \cdot \rho} \quad (1)$$

不考虑材料的内热源,式(1)可以简化为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

在式(1)和(2)中, q_m 为单位体积在单位时间内传递的能量 ($W \cdot m^{-3}$); τ 为脉冲宽度 (s); λ 为材料的热导率 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$); c 为材料热容 ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$); ρ 为材料密度 ($kg \cdot m^{-3}$)。

在激光清洗中,由于光斑面积远小于铝合金板的面积,因此该过程可以看成是个点热源加热半无限大的物体,其模型温度变化^[13-15]:

$$\Delta T = \frac{Q \cdot \sqrt{\alpha \cdot \tau}}{0.885 \lambda} \quad (3)$$

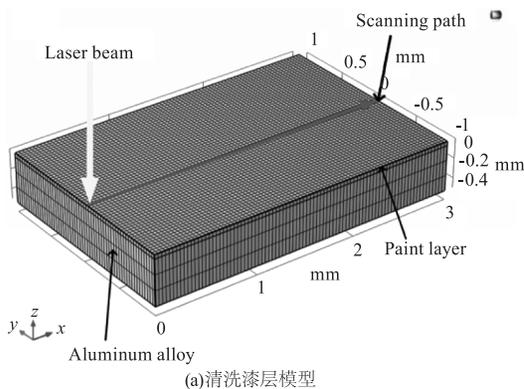
$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (4)$$

$$Q = \frac{P}{\pi \cdot R^2} \quad (5)$$

式中, ΔT 为温度上升值 (K); P 为激光功率 (W); Q 为功率密度 (W/m^2); α 为材料的导温系数 (m^2/s)。

2.2 理论模型的建立

COMSOL Multiphysics 软件中,通过添加固体传热和变形几何物理场,对材料表面加载广义热通量的方式,采取瞬态分析可以对不同时间内材料的不同位置进行温度场分析。根据上述方法建立了图 1 COMSOL 有限元模型。图 1(a) 为清洗漆层的模型示意图,包括尺寸大小为 $3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的 2219 铝合金基板,以及 $3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.04 \text{ mm}$ 的环氧聚酰胺底漆层。为了提高模拟仿真的准确性,需要对三维模型进行合理的网格划分,由于清洗过程主要是对油漆层进行处理,因此使用细化网格对油漆层划分,对于仿真结果影响较小的铝合金基板采用是常规网格划分。



(a)清洗漆层模型

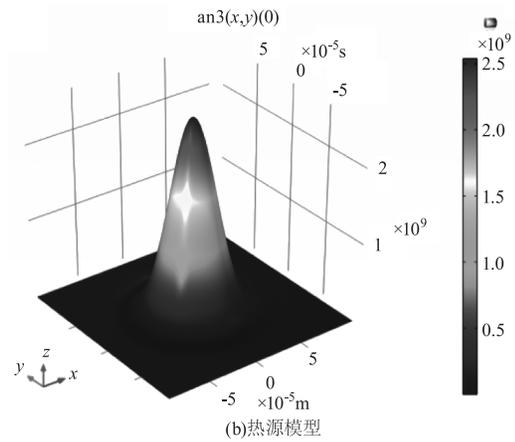


图 1 COMSOL 有限元模型

Fig. 1 Schematic diagram of COMSOL cleaning model

图 1(b) 为经典高斯脉冲热源,热源沿着 X 轴的正方向移动,下列表达式为热源 q 与功率密度,以及时间位移关系:

$$q = Q \cdot e^{-3 \frac{(x-v \cdot t)^2 + y^2}{R^2}} \quad (6)$$

式中, v 为沿 X 轴扫描速度 (m/s); R 为光斑半径 (m)。

当 COMSOL 软件在进行有限元分析时,需要输入相关材料的热物性参数,查阅相关资料^[16-17] 得到如表 1 所示的环氧聚酰胺漆层与 2219 铝合金的热物性参数表。

表 1 环氧聚酰胺底漆和铝合金的热物性参数

Tab. 1 Thermophysical parameters of epoxy polyamide prime and 2219 aluminum alloy

Parameter types	Paint	Aluminum alloy
Thermal Conductivity $\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	0.3	170
Density $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1.30×10^3	2840
Specific Heat $c/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	2528	864
Youngs Modulus Y/Pa	1.0×10^{10}	7×10^{10}
Poissons Ratio μ	0.17	0.3
Thermal Expansion γ/K^{-1}	6.0×10^{-6}	6.93×10^{-5}
Melting point/K	403 ~ 410	813 ~ 873
Boiling point/K	425 ~ 435	2000

2.3 温度场仿真及其结果分析

2.3.1 不同搭接率下表面温度场分布情况

下列为光斑搭接率 η 与扫描速度 v , 脉冲频率 f , 光斑直径 D 之间关系式^[18]:

$$\eta = 1 - \frac{v}{D \cdot f} \times 100 \% \quad (7)$$

其中,频率单位是 Hz;光斑直径单位是 m。

为了方便后续处理,本模型设置环氧聚酰胺底漆面为 XY 平面,激光源初始位置为 XY 面的坐标原点,光源沿着 X 轴正方向以设置的扫描速度进行移动。求解器步长设置为 $1/f$,结束时间为 $3/v$ (s)。设置在室温下,激光平均功率 20 W,重复频率 25 kHz,光斑半径 50 μm 时,不同的光斑搭接率 η 温度场分布情况。光斑搭接率为 0,此时漆层表面的温度场分布及清洗效果如图 2 所示。图 2(a)为温度场分布,图中表面峰值温度能够达到 700 K 左右,但相邻的两个光斑并没有重叠的部分,且没有热积累效应。当激光束向前移动时,相邻光斑之间存在着一些间隙,由于油漆的热传导系数很小,所以表层产生的热影响区很小,远离热源的热影响区温度会逐渐地降低。图 2(b)为清洗效果的剖面图,从图中可以看出,当搭接率为 0% 时,虽然能够清洗部分漆层,但是清洗深度未能达到基体表面,因此并不能完全清除漆层。

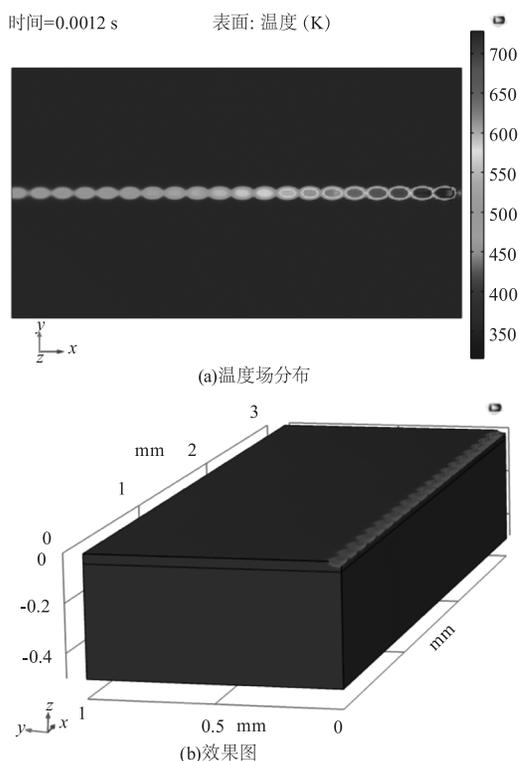


图 2 光斑搭接率为 0% 时表面温度场分布及效果图
Fig. 2 Surface temperature field distribution and effect when spot overlap rate is 0%

图 3 为光斑搭接率为 50 % 的环氧聚酰胺漆层表面不同时刻温度温度场的分布。从图中可以发现高斯脉冲热源照射漆层表面时,由于热源扩散路径是由光斑中心向四周辐射,因此光斑中心区域的温

度最大,热源沿着 X 轴方向以一个较快速度扫描时,温度场呈现拖尾状分布,并且光斑会以一定的重叠率连接在一起。当扫描速度为 1250 mm/s,光斑搭接率 50 % 时,相比较光斑搭接率 0,热积累效应明显,其表面峰值温度可以达到开尔文温度 750 K 以上,远远大于环氧聚酰胺底漆的气化温度,因此表面的底漆能够被有效地清除。

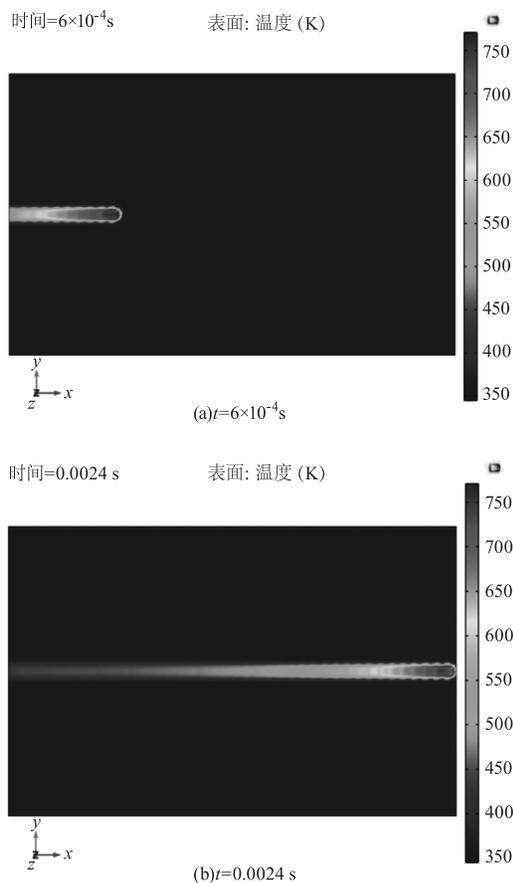


图 3 搭接率为 50 % 时不同时刻漆面温度场分布
Fig. 3 Temperature distribution of paint surface at different time when the lap rate is 50 %

为了更好地探究激光清洗漆层的过程中搭接率对温度场分布的影响,依次设置搭接率为 30 % , 40 % , 60 % , 70 % (对应扫描速度分别为 1750 mm/s, 1500 mm/s, 1000 mm/s, 750 mm/s),并对其进行有限元分析,图 4 为不同搭接率下漆层温度场分布情况。当搭接率为 30 % 和 40 % 时,相对于搭接率 50 % 其热影响区范围在进一步减小,漆层表面峰值温度虽然有所下降,但表面温度均能够达到清洗初始温度。当扫描速度 1000 mm/s,光斑搭接率 60 % 时,由于温度较高,热量在传导的过程中会在激光扫描路径上产生较大的热影响区。搭接率为 70 % 时,漆层表面峰值温度进一步升高,达到了 820 K 左右,在该参

数下,油漆表面会在瞬间蒸发,并且模型的整体温度相较于搭接率 30 % 和 40 % 有了明显上升。

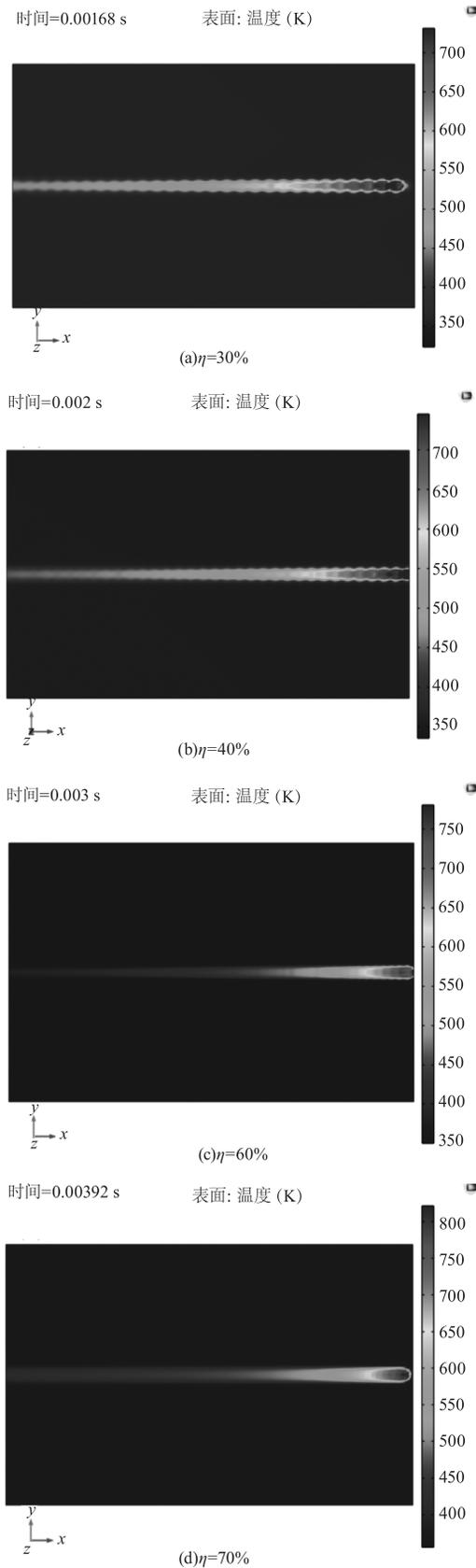


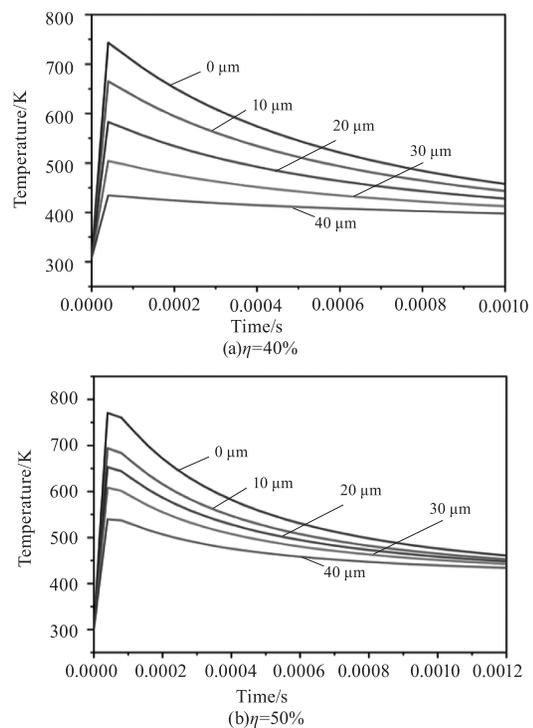
图 4 不同搭接率温度场分布

Fig. 4 Temperature field distribution of different lap rates

2.3.2 搭接率和能量密度对不同漆层厚度清洗效果的影响

由于模拟清洗的底漆层具有一定厚度,为了更好的分析清洗效果,需要探究 Z 方向(深度)温度场情况,在 COMSOL Multiphysics 软件中通过定义域点探针方式可以分析不同漆层深度的温度场分布。油漆层厚度为 40 μm,定义漆面为 0 μm 所在面,每隔 10 μm 作为一层,沿着 Z 轴负方向依次为 0 μm, 10 μm, 20 μm, 30 μm, 40 μm。

探针位置均设置在路径的中点,零时刻为光斑刚到达探针位置,激光平均功率为 20 W,图 5 为清洗过程中不同漆层厚度的温度随着时间的变化曲线。搭接率为 40 % 时,虽然在 0 ~ 30 μm 深度层的温度达到了气化温度,但是铝合金基体表面温度要小于环氧聚酰胺底漆气化温度,这说明了在该参数下,漆层未能完全清除。搭接率为 50 %,表面温度远大于底漆气化温度(430 K 左右),而油漆层与 2219 铝合金基体结合面(深度为 40 μm)的平均温度在 440 K 左右,大于油漆气化温度,但是小于基材熔点温度,这说明在此参数下可以在不损伤到铝合金基材的前提下,同时达到预定的清洗效果。搭接率为 60 % 时,基体表面的温度约超过了 500 K,虽然能够清除漆层,但是搭接率越大对应的扫描速度越小,所以相对于搭接率 50 % 其清洗效率较低。



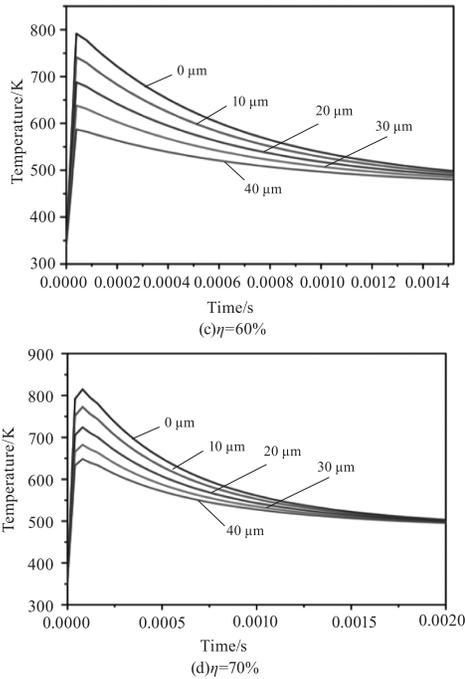


图 5 不同搭接率下对应漆层深度温度随时间变化曲线图
Fig. 5 Curve of temperature of the corresponding paint varies with time at different lap rates

当搭接率 η 为 70 % 时,当脉冲作用到探针位置时温度在极短时间内迅速上升,表层峰值温度达到了 820 K 以上,由于重叠率大于 50 %,因此在当下一个光斑到达时,温度还会继续上升,之后温度缓慢降低,从整体上看图中整个漆层温度都超过了油漆的沸点值,因此环氧聚酰胺漆层将会被清除。

激光光束是以脉冲的形式作用在漆层的表面,当脉冲频率为 25 kHz 时,不同的能量密度决定了清洗效果的好坏,下列为能量密度的表达式^[19]:

$$\begin{cases} E = \frac{P}{f} \\ \phi = \frac{E}{\pi R^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中, E 为单脉冲能量 (mJ); ϕ 为单脉冲能量密度 (J/cm^2)。

当光斑半径为 50 μm ,扫描速度 1250 mm/s,探究能量密度对于漆层厚度温度场分布影响,图 6 为不同能量密度对于各漆层深度达到的最高温度折线图。从图中可以看出,在已知参数下,当能量密度大于 7.64 J/cm^2 时,各漆层深度温度均大于气化温度,能够有效地清除底漆。当能量密度 5.1 J/cm^2 时,漆层深度 40 μm 的位置其最大温度未能达到清洗初始温度,因此该清洗过程并不能完全清除油漆,清洗结束时会在基体表面残留部分的漆层。

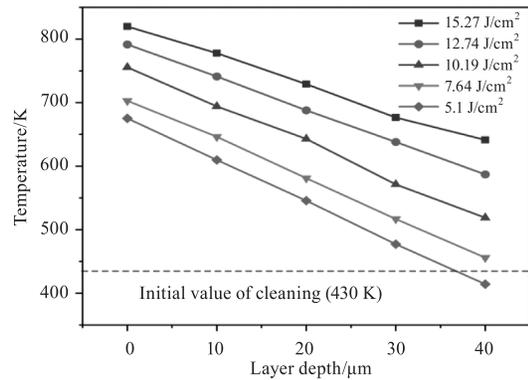
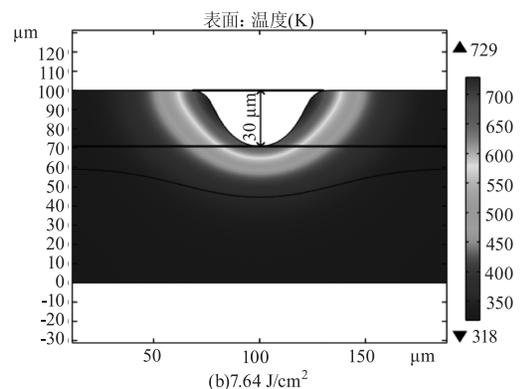
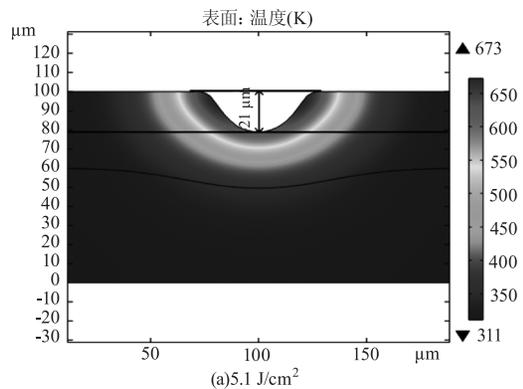


图 6 不同能量密度下各漆层深度的最高温度折线图
Fig. 6 Broken line diagram of maximum temperature of each point layer depth under different energy densities

2.3.3 能量密度对于烧蚀深度的影响

图 7 为不同能量密度 (5.1 J/cm^2 , 7.64 J/cm^2 , 10.19 J/cm^2 , 22.94 J/cm^2) 二维横截面烧蚀深图。可以看出,能量密度为 5.1 ~ 7.64 J/cm^2 时,尽管烧蚀深度随着能量密度的增大而增大,但是烧蚀深度均小于 40 μm ,因此基体表面会残存着部分油漆,当能量密度为 10.19 J/cm^2 烧蚀的深度达到了 40 μm ,漆层基本上被清除。能量密度为 22.94 J/cm^2 ,其达到的最大温度为 888 K,远大于漆层的气化温度,同时温度超过了 2219 铝合金的初熔温度 (约为 813 K),基体表面开始熔化,熔融状态下的铝合金流动形成了深度约为 54 μm 的凹坑,此时基体会被破坏。



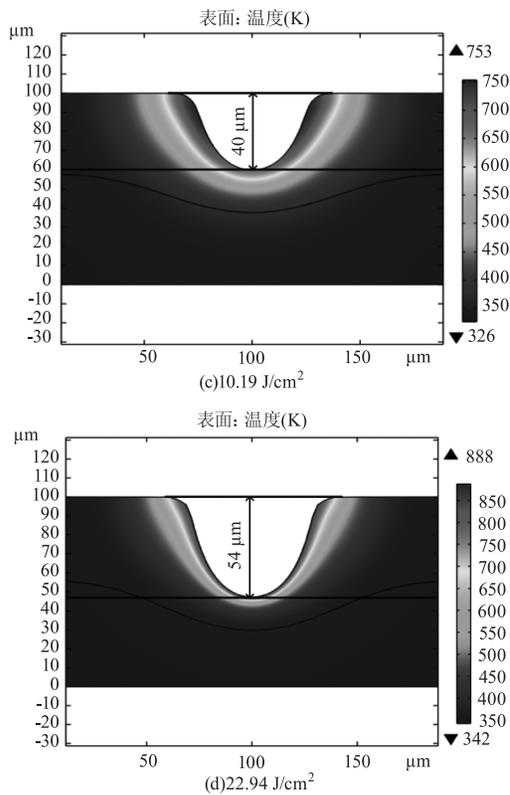


图 7 不同能量密度下烧蚀深度

Fig. 7 Ablation depth at different energy densities

3 实验与结果分析

3.1 实验器材

在实验中所用 2219 铝合金板的毛尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 在进行刷涂之前, 将环氧聚酰胺铁红色底漆与固化剂按 4 : 1 的比例混合, 为了改善油漆的工艺性能, 往油漆内加入适量的稀释剂。在进行正式地涂刷之前需要对铝合金进行预处理, 为了尽可能的保证铝合金表面的清洁, 使用酒精清洗其表面, 待其表面干燥之后, 然后在铝合金板表面均匀刷涂厚度约为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的漆层。清洗完成后使用德国 Carl Zeiss 公司生产 Smart zoom 5 超景深显微镜观察材料表面形貌, 其中清洗过程使用的 PFL 激光器采用 24 V 直流电源为其供电, 其主要参数如表 2 所示。

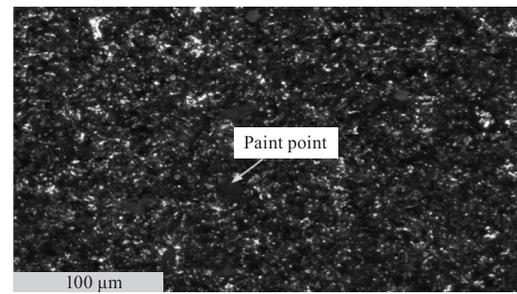
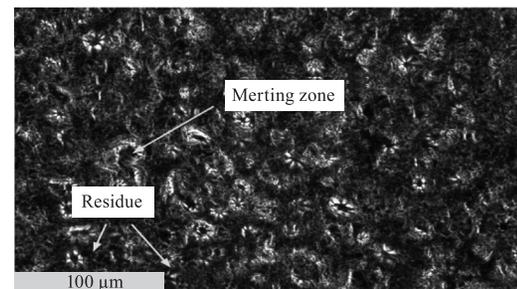
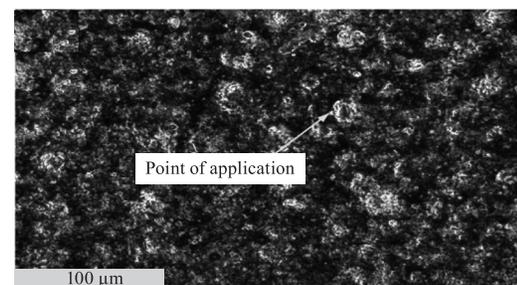
表 2 PFL 激光的主要技术参数

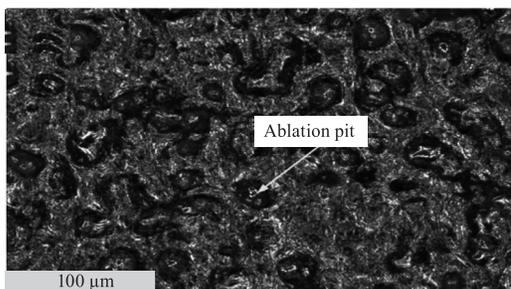
Tab. 2 The main technical parameters of PFL laser

Parameter	Value
Central wavelength/nm	1064 ± 5
Output power/W	≤ 50
Adjustable range/%	1 ~ 100
Repetition frequency/kHz	20 ~ 80
Beam quality M^2	< 1.6

3.2 实验结果及其分析

实验过程中光斑半径为 $50\text{ }\mu\text{m}$, 扫描速度 1250 mm/s , 重复频率 25 kHz , 通过改变能量密度得到图 8 不同能量密度清洗后的材料表面微观形貌, 能量密度为 5.1 J/cm^2 时, 从图中看出, 大部分的漆层可以被清除, 但是由于不同区域对于漆层的结合力不同, 因此仍然会有部分红褐色底漆层残留在表面。当能量密度为 7.64 J/cm^2 时, 在仿真模型里其烧蚀深度未能到达基体, 在实际中虽然表面仍然存在着少量残留物, 但是漆层基本上能够被清除, 这是由于仿真模型只考虑了横向搭接率, 而清洗过程设置的扫描间距会对纵向重叠的部分进行二次清洗。当能量密度为 10.19 J/cm^2 (对应功率 20 W), 表面漆层被清除, 激光束对于基体本身没有明显的烧蚀, 因此在该参数下能够有效地清除漆层。能量密度达到 22.94 J/cm^2 , 由于温度超过了铝合金初融温度, 基体被严重破坏, 并且基体熔化产生的堆积物沿着光斑移动路径形成了很多的烧蚀凹坑, 表面粗糙度激增, 清洗效果变差。

(a) 5.1 J/cm^2 (b) 7.64 J/cm^2 (c) 10.19 J/cm^2

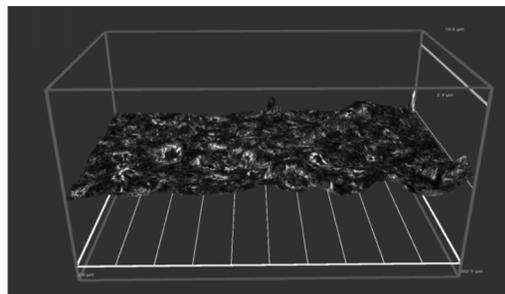


(d) 22.94 J/cm²

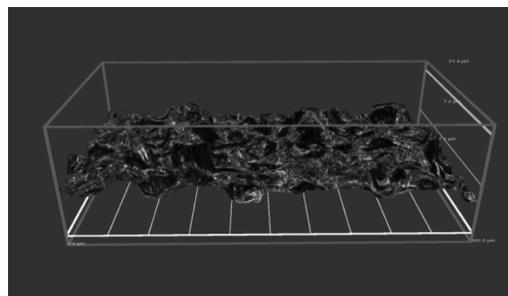
图8 不同能量密度清洗材料表面微观形貌

Fig. 8 Surface microstructure of materials cleaned with different energy densities

工业生产中通过涂漆处理可以防止铝合金由于应力腐蚀开裂(SCC)而失效,当激光清除完铝合金表面旧漆,重新涂装新漆过程中不同的表面粗糙度会影响漆层的防护作用。图9为不同扫描速度清洗材料3D轮廓图,图10为不同搭接率清洗材料表面粗糙度曲线图。结合图9和图10,当激光功率为20W,搭接率为40%,清洗结束后粗糙度Ra约为0.1148μm,表面较为光滑影响漆层对铝合金表面的附着力,降低了漆层的防护作用。搭接率为50%和60%时,材料表面的漆层被完全清除,其表面粗糙度Ra(分别为0.1568μm和0.1724μm)能够满足涂装的工艺要求。当搭接率70%时,从图中看出基体烧蚀严重,表面有不少因材料熔化产生的凹坑,通过测量粗糙度Ra约为0.2442μm,表面粗糙度过大不仅使得表面残余应力增大影响其使用性能,还会导致后期重新涂装的效果不佳。



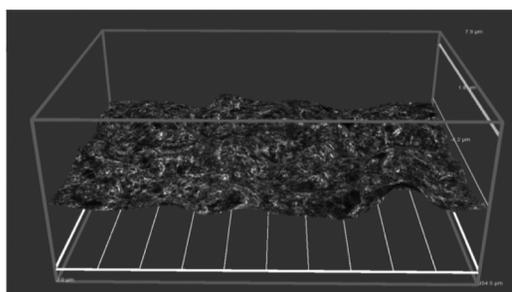
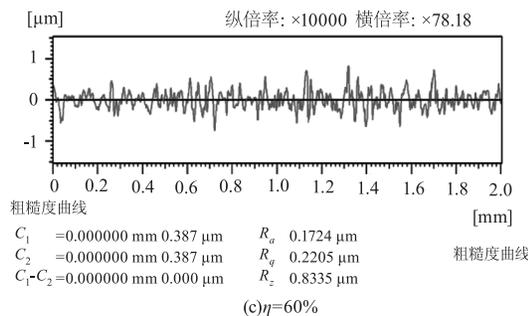
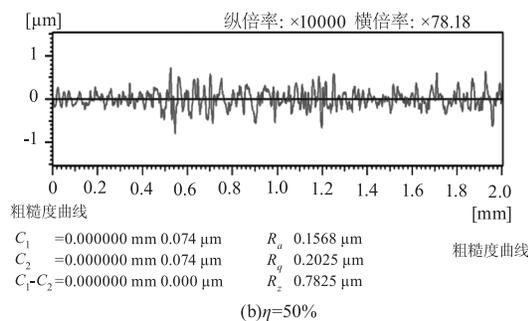
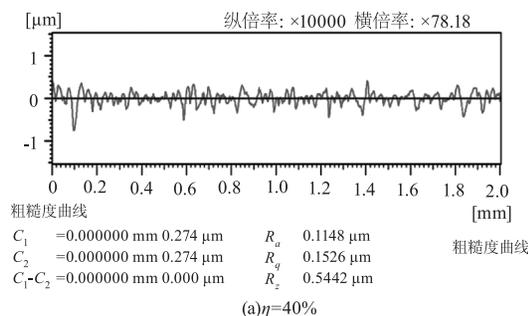
(c) η = 60 %



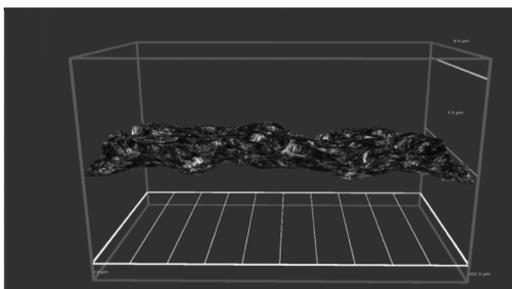
(d) η = 70 %

图9 不同搭接率清洗材料后三维轮廓图

Fig. 9 3D profile of the surface of the material cleaned at different lap rates



(a) η = 40 %



(b) η = 50 %

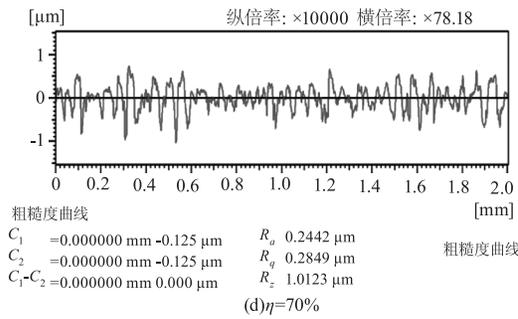


图 10 不同搭接率清洗材料表面粗糙度曲线图

Fig. 10 Surface roughness curves of cleaning materials with different lap rates

4 结论

综上所述:在 COMSOL 软件中通过改变光斑搭接率和能量密度,探究了其对清洗过程中温度场和烧蚀深度的影响,并利用激光仪器和检测设备对仿真结果进行了验证。

(1) 仿真结果表明,在考虑到清洗效率的前提下,当平均功率 20 W,扫描速度为 1250 mm/s(搭接率 50%)时其清洗效果最佳;能量密度为 10.19 J/cm²时,清洗的深度为 40 μm ,能够清除漆层,且不会损坏铝合金基体;能量密度为 22.94 J/cm² 烧蚀的深度为 54 μm ,基体遭到破坏。

(2) 在实际实验中,激光功率为 20 W,光斑搭接率 40%时,由于基体表面的温度未超过气化温度因此并不能将油漆层完全清除,并且清洗过后表面被氧化。搭接率为 50%和 60%时,表层的漆层基本被清除,表面粗糙度能够到达铝合金涂漆工艺要求,搭接率 70%时,由于产生的温度超过了铝合金的熔化温度,在清洗底漆的过程中激光束会烧蚀基体,并在其表面产生凹坑,导致表面粗糙度增大影响油漆层对铝合金保护作用。

(3) 通过观察清洗后的微观形貌看出,当扫描速度设置为 1250 mm/s(重叠率为 50%)时,能量密度在 5.1~10.19 J/cm² 的范围内,随着能量密度的增加清洗效果越来越好。当能量密度达到 22.94 J/cm²,基体被烧蚀的同时会沿着激光清洗的路径上产生许多凹坑,清洗效果不佳。

本文中仿真结果与实际结果的偏差来源主要有两点:①数值仿真是以烧蚀深度刚好达到漆层厚度为最优结果,而通常实际实验中清除漆层最优结果出现在烧蚀深度略大于漆层厚度;②设计仿真模型时光斑搭接率只考虑了横向搭接率,并没有考虑到

纵向搭接率,但是在实际过程中扫描间距对于纵向搭接率会有影响。

参考文献:

- [1] Wei Yanjin, Peng Zhangzhu, Chen Ya. Analysis on laser cleaning of 6005A aluminum alloy for high speed train [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2020, 43(3): 71-75. (in Chinese)
韦彦锦, 彭章祝, 陈亚. 高铁列车用 6005A 铝合金激光清洗技术分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(3): 71-75.
- [2] Chen G X, Kwee T J, Tan K P, et al. Laser cleaning of steel for paint removal[J]. Applied Physics A, 2010(2): 249-253.
- [3] Luo Ya, Wang Xuan, Zhao Huifeng, et al. Effect of laser cleaning on the surface morphology and welding performance of 2219 aluminum alloy[J]. Applied Laser, 2017, 37(4): 544-549. (in Chinese)
罗雅, 王璇, 赵慧峰, 等. 激光清洗对 2219 铝合金表面形貌及焊接性能的影响[J]. 应用激光, 2017, 37(4): 544-549.
- [4] Liu Caifei, Feng Guoying, 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. (in Chinese)
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(2): 274-279.
- [5] Gao Liaoyuan, Zhou Jianzhong, Sun Qi, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser-cleaned aluminum alloy 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.
- [6] Qiu Wentai, Yi Junlan, Cheng Cheng, et al. Characteristics of nanosecond pulse laser cleaning paint coatings from 2024 Al alloy surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 168-175. (in Chinese)
邱文太, 易俊兰, 程程, 等. 纳秒脉冲激光清洗 2024 铝合金表面油漆涂层特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 168-175.
- [7] Guo Zhaoheng. Numerical simulation and experimental research on nano-second pulse laser paint removal[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)

- 郭召恒. 纳秒脉冲激光除漆的数值模拟与实验研究 [D]. 镇江:江苏大学,2020.
- [8] Guo Zhaoheng, Zhou Jianzhong, et al. Nanosecond-pulsed-laser paint stripping of HT250 gray cast iron[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10):191-197. (in Chinese)
郭召恒, 周建忠, 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.
- [9] M P Mateo, T Ctvrtnickova, E Fernandez, et al. Laser cleaning of varnishes and contaminants on brass[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(10):5579-5583.
- [10] Shi T Y, Wang C M, Mi G Y, et al. A study of microstructure and mechanical properties of aluminum alloy using laser cleaning [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42:60-66.
- [11] Tian Z, Lei Z L, Chen X, et al. Nanosecond pulsed fiber laser cleaning of natural marine micro-biofoulings from the surface of aluminum alloy[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244:118724.
- [12] Zhou Guilian, Kong Lingbing, Sun Haiying. Finite element analysis of temperature field based ANSYS in laser cleaning mold[J]. Manufacturing Automation, 2008, (9):90-92. (in Chinese)
周桂莲, 孔令兵, 孙海迎. 基于 ANSYS 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.
- [13] Zhao Hhaicao, Qiao Yulin, Du Xian, et al. Research on the technology of paint removal for aluminum alloy by pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 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.
- [14] Chen Yiming, Zhou Longzao, Yan Fei, et al. Mechanism and quality evaluation of laser cleaning of aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12):87-94. (in Chinese)
陈一鸣, 周龙早, 闫飞, 等. 铝合金激光清洗机理与质量评估[J]. 中国激光, 2017, 44(12):87-94.
- [15] Song Feng, Zou Wanfang, Tian Bin, et al. Model of one-dimensional thermal stress applied in paint removal by Q-switched short pulse laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, (11):1577-1581. (in Chinese)
宋峰, 邹万芳, 田彬, 等. 一维热应力模型在调 Q 短脉冲激光除漆中的应用 [J]. 中国激光, 2007, (11):1577-1581.
- [16] Chen Boyan, Chen Yuanting, Li Xianfen, et al. Laser-MIG hybrid welding of 2219 aluminum alloy and its numerical simulation on temperature field[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019, (9):78-82. (in Chinese)
陈柏炎, 陈远亭, 李先芬, 等. 2219 铝合金激光电弧复合焊接及其温度场的模拟 [J]. 制造技术与机床, 2019, (9):78-82.
- [17] Sun Haoran. Research on technology and mechanism of laser composite cleaning paint coating from aluminum alloy surface [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
孙浩然. 铝合金表面油漆涂层激光复合清洗工艺及去除机制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [18] Jasim H A, Demir A G, Previtali B, et al. Process development and monitoring in stripping of a highly transparent polymeric paint with ns-pulsed fiber laser [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 93:60-66.
- [19] Long Risheng, Liu Weijun, Shang Xiaofeng. Numerical simulation of temperature field on laser metal deposition shaping [J]. Laser Technology, 2007, (4):394-396, 430. (in Chinese)
龙日升, 刘伟军, 尚晓峰. 激光金属沉积成形过程中温度场的数值模拟 [J]. 激光技术, 2007, (4):394-396, 430.