

## 激光与光电子学进展

## 纳秒脉冲激光清洗 DC04 冷轧带钢表面油污的数值模拟与实验研究

郝佳帆<sup>1,2,3</sup>, 秦文斌<sup>1,2,3\*</sup>, 刘友强<sup>1,2,3</sup>, 姜梦华<sup>1,2,3</sup>, 曹银花<sup>1,2,3</sup>, 王智勇<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>北京工业大学材料与制造学部北京市激光应用技术工程技术研究中心, 北京 100124;<sup>2</sup>北京工业大学跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室, 北京 100124;<sup>3</sup>北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124

**摘要** 针对 DC04 冷轧带钢表面冷轧油的清洗需求, 利用 COMSOL Multiphysics 软件对纳秒脉冲激光清洗 DC04 冷轧带钢表面油污的温度场分布及油污去除过程建立模型, 结果表明, 当光斑半径为 80  $\mu\text{m}$ 、激光能量密度达到 3.48  $\text{J}/\text{cm}^2$  时, 油污基本上可以被去除。然后, 利用纳秒脉冲激光对冷轧带钢表面的冷轧油进行了激光清洗实验研究。结果表明, 当激光能量密度达到 3.48  $\text{J}/\text{cm}^2$ 、激光光斑搭接率为 50% 时, 油污基本上被去除, 符合模拟仿真结果。另外, 还对激光光斑搭接率对激光清洗效果的影响进行了研究, 结果表明, 当激光光斑搭接率降低至 37.5% 时, 激光能量密度需增大至 4.47  $\text{J}/\text{cm}^2$ 。因此, 利用纳秒脉冲激光可以有效清洗 DC04 冷轧带钢表面的冷轧油, 并且不会对带钢表面造成明显损伤, 为纳秒脉冲激光清洗其他种类材料表面油污的工艺参数确定提供了参考。

**关键词** 激光清洗; 纳秒脉冲激光; DC04 冷轧带钢; 油污; 有限元模拟

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230939

## Numerical Simulation and Experimental Study of Nanosecond Pulse Laser Cleaning of DC04 Cold-Rolled Strip Surface Oil

Hao Jiafan<sup>1,2,3</sup>, Qin Wenbin<sup>1,2,3\*</sup>, Liu Youqiang<sup>1,2,3</sup>, Jiang Menghua<sup>1,2,3</sup>, Cao Yinhua<sup>1,2,3</sup>, Wang Zhiyong<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>Beijing Engineering Research Center of Laser Technology, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Trans-Scale Laser Manufacturing Technology (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China;<sup>3</sup>Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

**Abstract** According to the cleaning demand of cold rolled oil on DC04 cold rolled strip surface, we use COMSOL Multiphysics software to establish the temperature field distribution and oil stain removal process model of nanosecond pulse laser cleaning oil stain on DC04 cold rolled strip surface. The results show that when the spot radius is 80  $\mu\text{m}$  and the laser energy density reaches 3.48  $\text{J}/\text{cm}^2$ , the oil can be basically removed. Then, a nanosecond pulsed laser is used to clean cold rolled oil on the surface of cold rolled strip steel. The results show that when the laser energy density exceeds 3.48  $\text{J}/\text{cm}^2$  and the laser spot overlap rate is 50%, the oil pollution can be removed, which is consistent with the simulation results. In addition, the influence of laser spot overlap rate on laser cleaning effect is also studied. The results show that the laser energy density should be increased to 4.47  $\text{J}/\text{cm}^2$  when the spot overlap rate is reduced to 37.5%. Therefore, nanosecond pulsed laser can effectively clean the cold rolled oil on the surface of DC04 cold rolled strip without causing obvious damage to the surface of the strip, which provides a reference for determining the process parameters of nanosecond pulsed laser to clean other kinds of materials.

**Key words** laser cleaning; nanosecond pulsed laser; DC04 cold rolled strip; oil pollution; finite element simulation

收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-05-08; 录用日期: 2023-05-19; 网络首发日期: 2023-07-12

通信作者: \*wbqin@bjut.edu.cn

## 1 引言

DC04 冷轧带钢经过冷轧工序后,表面会残留一层以油脂和铁粉为主要组成成分的污染物。在后续退火过程中,残留的油脂会成为碳化物,影响镀层的附着性能;残留的铁粉等会引起退火炉炉辊结瘤,使带钢表面形成划伤或压痕缺陷<sup>[1-2]</sup>。因此,DC04 冷轧带钢的表面油污清洗至关重要。传统的冷轧带钢清洗工艺一般为化学清洗、物理清洗、电解清洗的组合式多级强化清洗,然而,该工艺存在流程复杂、占地面积大、清洗成本高、废水废气排放量大等问题<sup>[1]</sup>,因此,开发一种更加绿色高效的清洗方式来替代传统的清洗工艺具有重要意义。激光清洗技术具有无接触、效率高、成本低、清洁度高、绿色环保等优点,可以被应用于清洗不同材料表面的漆层<sup>[3-4]</sup>、锈层<sup>[5-6]</sup>、油污<sup>[7-9]</sup>、氧化层<sup>[10-11]</sup>等,因此激光清洗技术相较于传统清洗技术更具有应用前景。

Lafargue 等<sup>[7]</sup>利用 193 nm 紫外激光和倍频 Nd:YAG 激光对冷轧钢板表面的残留油污与铁粉进行了激光清洗实验,在 5 次激光照射下,可以去除碳钢表面 90% 的残留轧制油和 75% 的铁粉。Ahn 等<sup>[9]</sup>利用 Nd:YAG 激光器与紫外光激光器对去除碳钢、不锈钢和铜表面的冷轧油进行了研究,证明了油污的光学性质、厚度和激光能量的大小是影响激光除油效果的主要因素,并分别阐述了不同波长激光作用下激光清洗的不同机理。陈翊坤等<sup>[12]</sup>利用纳秒脉冲激光和飞秒脉冲激光分别对航空发动机的油滤和燃油喷嘴进行了激光清洗,并得到了最佳清洗参数。段成红等<sup>[13]</sup>利用纳秒脉冲激光对石化设备不同污染物区域进行了激光清洗研究,并针对不同污染物提出了不同的清洗参数方案。

上述研究主要针对激光清洗不同材料表面油污的工艺参数,对激光清洗油污的具体作用过程及数值模拟的研究较少。为了对纳秒脉冲激光清洗 DC04 冷轧带钢表面油污的作用机理与工艺参数进行研究,本文利用 COMSOL Multiphysics 有限元模拟仿真软件对纳秒脉冲激光清洗冷轧带钢表面油污的温度场分布及油污去除过程建立模型,再通过激光清洗冷轧带钢表面油污实验对模拟结果进行验证。

## 2 数值模拟

### 2.1 理论模型

利用近红外激光去除低碳钢、碳钢及不锈钢等金属表面的油膜污染层时,激光脉冲被油膜弱吸收,而金属相对于油膜会吸收大部分的激光能量<sup>[9]</sup>。所用冷轧带钢表面冷轧油的主要成分包括矿物油、天然酯和少量的油性剂,它们对 1064 nm 波段的激光为弱吸收;而冷轧钢板对 1064 nm 波段的激光为强吸收,与上述近红外激光去除金属表面油膜污染的情况基本一致。因此,利用波长为 1064 nm 的纳秒脉冲激光清洗冷轧钢

板表面轧制油时,其主要过程为相爆炸效应(phase explosion effect)<sup>[9]</sup>:如图 1 所示,激光经光学系统整形并聚焦后照射于待清洗钢板表面,油污基本上不吸收激光能量,因此激光脉冲透过油污后被钢板上表面吸收,导致油污与钢板基底交界处产生快速热膨胀和爆炸性气化,气化产生的高压蒸气聚集在油-基界面处并对外膨胀,将油污等污染物喷射带离出基底表面,达到去除钢板表面油污的目的。

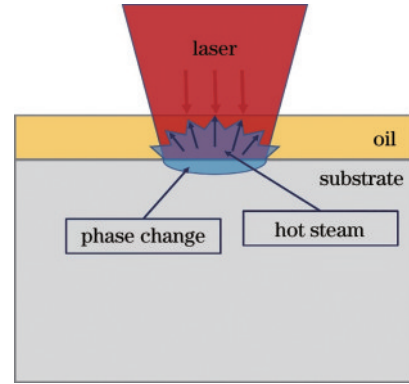


图 1 相爆炸效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of phase explosion effect

针对相爆炸效应的特性,所提纳秒脉冲激光清洗油污的理论模型主要分为两个部分:1)温度场分布模型,激光清洗过程中,基底材料首先吸收激光能量并将其转化为热能,使得基底材料表面的温度快速上升并在其内部和表面产生热传导;2)油污去除模型,当基底材料的温度上升至其熔点甚至气化点时,基底材料会产生相变,并在基底与油污的交界处产生高温高压的热蒸气,热蒸气向外喷发并将油污带离基底表面。具体过程如下:

#### 1) 温度场分布模型

激光清洗过程中的热传导遵循能量守恒定律与傅里叶定律,其瞬态三维热传导控制方程<sup>[14-15]</sup>为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + (1 - R) I_0(x, y, z), \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为材料的密度; $c$ 为材料的比热容; $T$ 为激光加载面的表面温度; $t$ 为时间; $\kappa$ 为材料的导热系数; $R$ 为材料对激光的反射率; $I_0(x, y, z)$ 为激光的功率密度。模型的初始条件与边界条件<sup>[14-15]</sup>包括模型各边界的初始温度、模型边界与外部的热对流以及模型各边界的热辐射,分别表示为:

$$\begin{cases} t=0 \\ T(t) = T_0 \end{cases}, \quad (2)$$

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_0 - T), \quad (3)$$

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = \epsilon k_b (T_0^4 - T^4), \quad (4)$$

式中： $T$ 为激光加载面的表面温度； $T_0$ 为环境温度（20℃）； $n$ 为模型边界处的外法线； $h$ 为对流换热系数； $\epsilon$ 为表面热辐射系数； $k_b$ 为玻尔兹曼常数。

## 2) 油污去除模型

在激光能量的作用下，油污与基底材料界面处产生的蒸气量对激光清洗的效果起决定性作用，该量以蒸发质量流量（vaporized mass flow rate） $M_t$ 来表示<sup>[16]</sup>，其表达式为

$$M_t = \sqrt{\frac{m}{2\pi k_b T}} \times P_{\text{sat}}(T) \times (1 - \beta), \quad (5)$$

$$P_{\text{sat}}(T) = P_{\text{atm}} \times \exp\left[\frac{mL_v}{k_b} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (6)$$

式中： $m$ 为原子质量； $P_{\text{sat}}$ 为相变所产生的蒸气压； $\beta$ 为扩散系数； $P_{\text{atm}}$ 为环境压强； $L_v$ 为材料的蒸发潜热； $T_v$ 为材料的蒸发温度。已知材料在激光能量作用下的温度分布，求解式(5)、式(6)即得蒸发质量流量的值。

当相变产生的蒸发质量流量足够大时，流量堆积产生的高压蒸气聚集在油-基界面处并向外膨胀，将油污带离基底表面。油污去除过程可以视为一个两相流系统，采用水平集方法对蒸气和油污两相进行运动追踪，水平集控制方程<sup>[17]</sup>为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mu \cdot \nabla \phi = -\gamma \left\{ \nabla \cdot \left[ \phi(1 - \phi) \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right] - \eta \cdot \nabla \cdot \nabla \phi \right\}, \quad (7)$$

式中： $\phi$ 为相场变量，取值范围为0~1； $\mu$ 为流体黏度； $\nabla$ 为哈密顿算子； $\gamma$ 为迁移率； $\eta$ 为界面层的厚度。

## 2.2 有限元模型

基于相爆炸机理与理论模型分析，利用COMSOL软件进行建模。首先，建立温度场分布模型，对带钢表面与内部吸收激光能量后的温度场分布进行模拟；其次，通过改变激光单脉冲能量，研究不同激光能量下带钢表面的温度分布，当温度达到带钢蒸发温度时，带钢与油污交界处会产生爆炸性气化；最后，根据温度场分布模型计算得到不同激光单脉冲能量下的蒸发质量流量，并建立两相流-水平集油污去除模型。将蒸发质量流量加载至水平集入口，相爆炸效应产生的气体将油污带离基底表面，当油污明显脱离基底表面时，认为达到了激光清洗的效果。

### 2.2.1 温度场分布模型

如图2所示，设定激光清洗DC04冷轧钢板试样的几何尺寸为0.6 mm×0.6 mm×0.1 mm，并对几何模型进行网格划分。由于冷轧油对近红外激光呈弱吸收特性，因此模型主要对冷轧钢板试样进行建模并研究其温度变化特性。模型选用的DC04冷轧带钢和冷轧油的热物性参数如表1所示。

在模拟激光清洗时，利用COMSOL软件中的固体传热模块，激光能量以广义向内热通量的形式加载至模

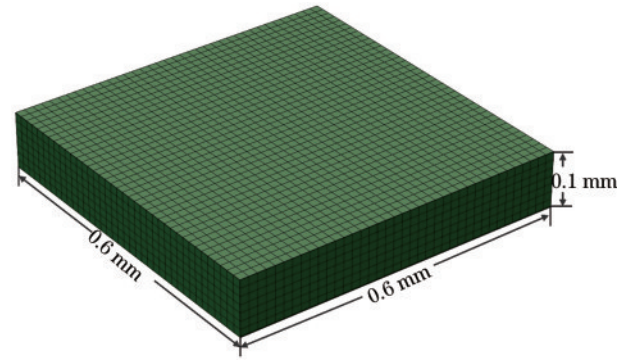


图2 温度场分布模型尺寸及网格划分

Fig. 2 Model size and grid division of temperature field distribution

表1 DC04冷轧带钢和冷轧油的热物性参数<sup>[18]</sup>

Table 1 Thermophysical parameters of DC04 steel and cold rolling oil<sup>[18]</sup>

Parameter	DC04 steel	Cold rolling oil
Density / (kg/m <sup>3</sup> )	7860	900
Heat conductivity / (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	52.00	0.15
Specific heat / (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	470	2000
Melting temperature / °C	1515	-5
Latent heat of evaporation / (kJ/kg)	6440	240
Boiling point / °C	2927	450~500

型上表面，软件内置的热传导控制方程同式(1)一致。设定模型分析类型为瞬态分析，并设置时间步在不同时刻加载激光能量，以实现对不同时刻钢板表面温度场的模拟。设定输入激光能量的分布类型为高斯分布。

### 2.2.2 温度场分布模型计算

激光能量密度 $\psi$ (J/cm<sup>2</sup>)的计算公式为

$$\psi = \frac{E}{S} = \frac{P}{f\pi r^2}, \quad (8)$$

式中： $E$ 为激光单脉冲能量(J)； $S$ 为聚焦光斑的面积(cm<sup>2</sup>)； $P$ 为激光平均功率(W)； $f$ 为激光重复频率(Hz)； $r$ 为光斑半径(cm)。

设定激光光斑半径为80 μm，激光重复频率为50 kHz，分别设定激光单脉冲能量为0.4, 0.6, 0.7, 0.8 mJ，计算得到带钢表面在激光能量作用下的温度场分布。如图3所示，激光单脉冲能量作用下钢板表面的温度场分布与激光光斑能量分布基本一致。

如图4所示，随激光单脉冲能量的增大，钢板表面最大温度随之增大。当单脉冲能量 $E$ 为0.4 mJ或0.6 mJ时，钢板表面最大温度分别为1688.4℃和2492.6℃，未达到冷轧钢板的气相温度线2923℃，因此钢板材料无气化现象发生，无法产生相爆炸效应。当单脉冲能量超过0.7 mJ，即激光能量密度超过3.48 J/cm<sup>2</sup>时，钢板表面最大温度可达2984.3℃，超过了钢板的蒸发温度，此时材料会发生气化，进而产生相爆炸效应。

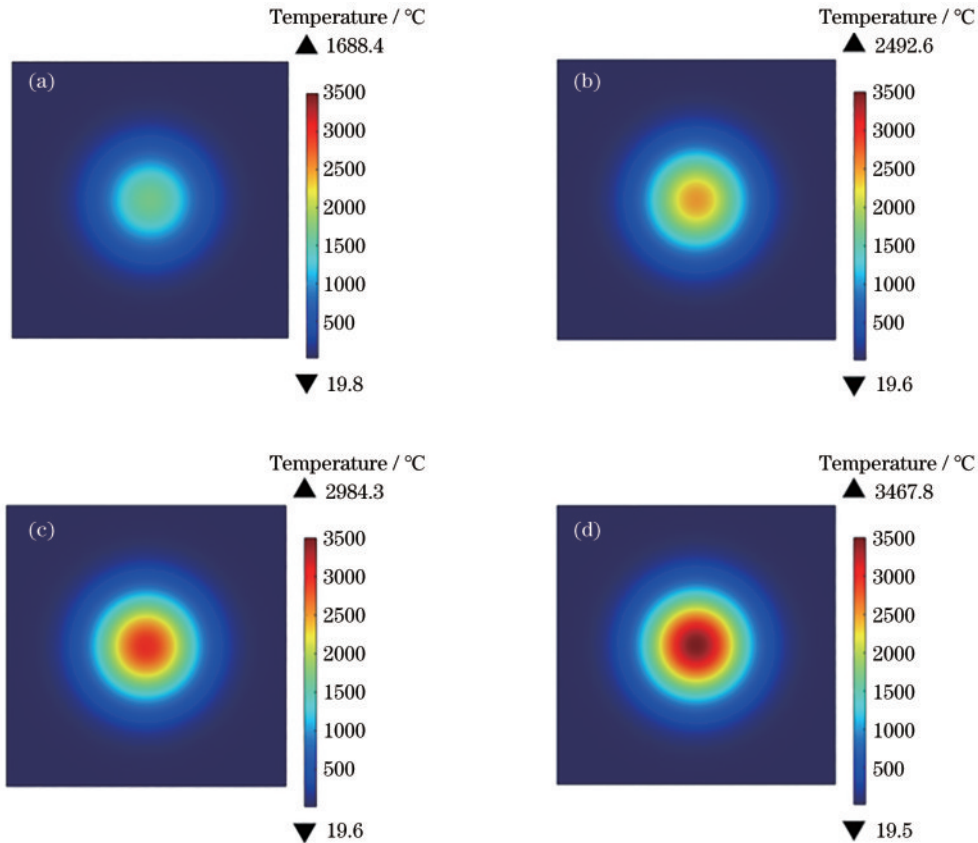


图 3 不同单脉冲能量下冷轧钢板表面温度分布。(a)  $E=0.4$  mJ; (b)  $E=0.6$  mJ; (c)  $E=0.7$  mJ; (d)  $E=0.8$  mJ

Fig. 3 Surface temperature distribution of cold rolled steel plate under different single pulse energies. (a)  $E=0.4$  mJ; (b)  $E=0.6$  mJ; (c)  $E=0.7$  mJ; (d)  $E=0.8$  mJ

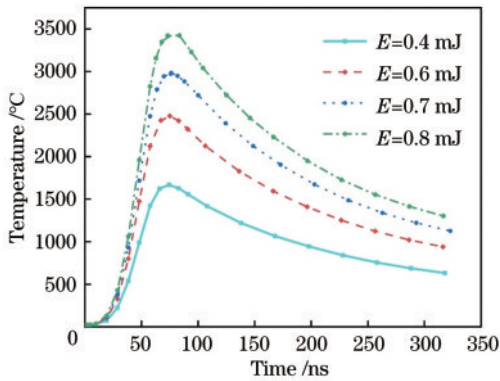


图 4 不同激光单脉冲能量下,冷轧钢板表面温度随时间的变化曲线

Fig. 4 Surface temperature variation curves of cold rolled steel sheet under different laser single pulse energies

冷轧钢板吸收激光能量后将向其内部产生热传导,导致钢板内部一定深度范围内温度迅速上升,钢板内部温度场分布对钢板的烧蚀深度有决定性影响。如图 5 所示,其中: $X$ 为横坐标; $Y$ 为纵坐标。设定钢板熔化温度( $1515\text{ }^{\circ}\text{C}$ )为最低温度绘制等温线,相邻等温线的温度差为  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对模型计算结果进行后处理。结果表明:当单脉冲能量为  $0.4\text{ mJ}$  时,钢板的烧蚀深度为  $0.3\text{ }\mu\text{m}$ ;当单脉冲能量为  $0.6\text{ mJ}$  时,钢板的烧蚀深

度为  $1.1\text{ }\mu\text{m}$ ;当单脉冲能量为  $0.7\text{ mJ}$  时,钢板的烧蚀深度为  $1.4\text{ }\mu\text{m}$ ;当单脉冲能量为  $0.8\text{ mJ}$  时,钢板的烧蚀深度为  $1.7\text{ }\mu\text{m}$ 。激光单脉冲能量作用下的烧蚀深度远低于钢板厚度,因此钢板表面基本不会有损伤。

### 2.2.3 油污去除模型

为实现油污去除过程的可视化模拟,选用 COMSOL 中的两相流-水平集模块对油污的去除过程进行建模,软件内置控制方程同式(7)一致。如图 6 所示,模型为二维模型,主要结构分为三层:上层矩形材料为空气;中间矩形材料为厚度为  $1\text{ }\mu\text{m}$  的油污层;最下层矩形为水平集的入口。模型的网格划分形式为上疏下密,不同材料交界处的网格最密,以提高模型计算的精度。将在激光能量作用下油污与基底交界处产生的蒸发质量流量  $M_i$  加载至水平集的入口,模拟计算即可实现对蒸气、油污两相界面的运动追踪,实现油污去除过程的可视化模拟。

### 2.2.4 油污去除模型计算

将温度场模型计算结果代入式(5)和式(6)中,即可得到蒸发质量流量  $M_i$  随时间的变化曲线,如图 7 所示。当激光单脉冲能量  $E$  为  $0.4\text{ mJ}$  或  $0.6\text{ mJ}$  时,  $M_i$  基本为 0;当激光单脉冲能量为  $0.7\text{ mJ}$  时,  $M_i$  最大可达  $14.917\text{ Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ;当激光单脉冲能量为  $0.8\text{ mJ}$  时,  $M_i$  最大可达  $68.153\text{ Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

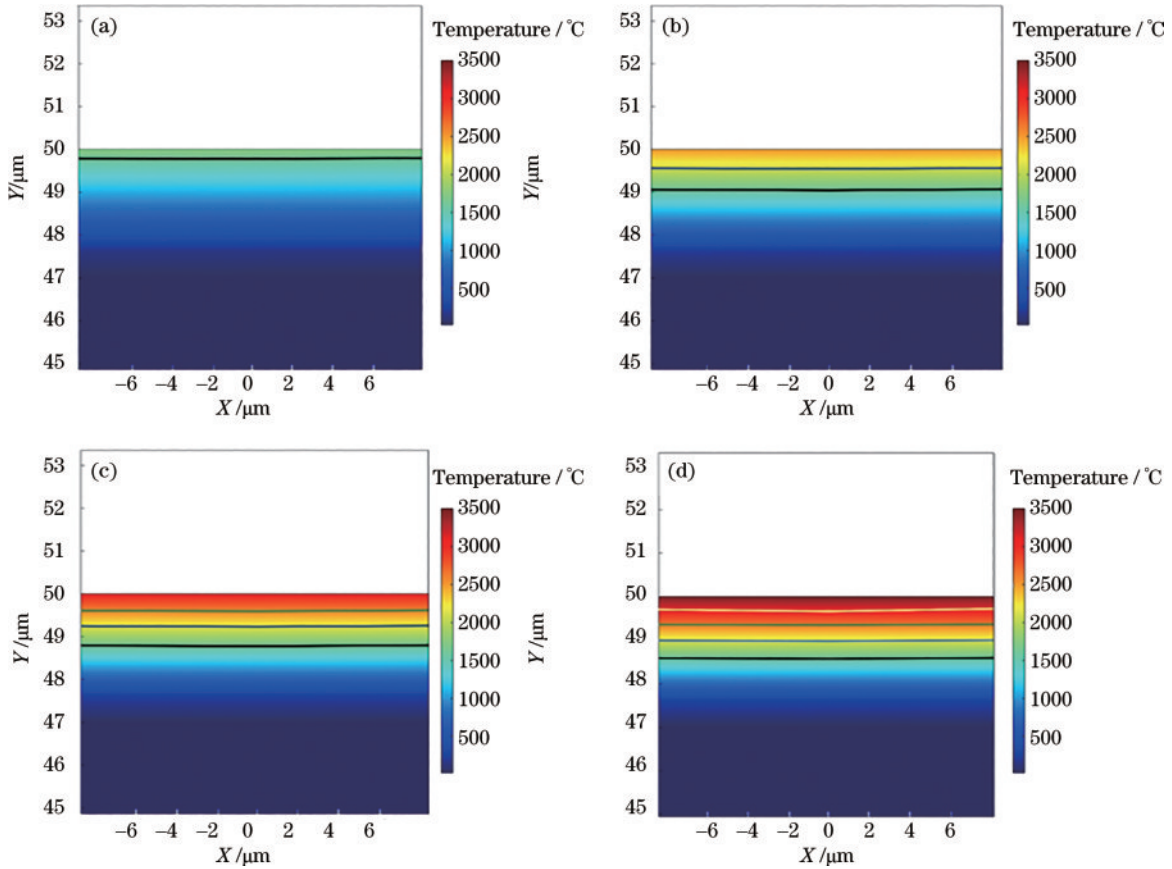


图 5 不同单脉冲能量下冷轧钢板切面温度分布。(a)  $E=0.4$  mJ; (b)  $E=0.6$  mJ; (c)  $E=0.7$  mJ; (d)  $E=0.8$  mJ

Fig. 5 Temperature distribution of cold rolled steel sheet section under different single pulse energies. (a)  $E=0.4$  mJ; (b)  $E=0.6$  mJ; (c)  $E=0.7$  mJ; (d)  $E=0.8$  mJ

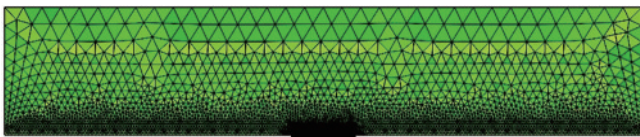


图 6 油污去除模型尺寸及网格划分

Fig. 6 Model size and grid division of oil pollution removal model

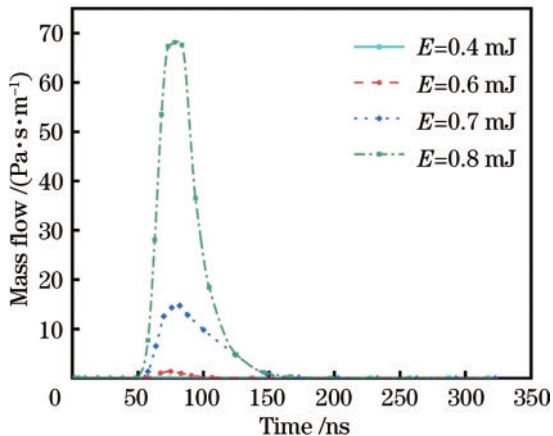


图 7 不同激光单脉冲能量下,油基界面处蒸发质量流量随时间的变化曲线

Fig. 7 Evaporative mass flow variation curves at oil-based interface under different laser single pulse energies

将蒸发质量流量随时间的变化加载到两相流-水平集模型入口,对油污去除过程进行模拟。如图 8 所示:当激光单脉冲能量为 0.6 mJ 时,钢板表面油污基本没有变化;当激光单脉冲能量为 0.7 mJ 或 0.8 mJ 时,钢板表面油污基本上被去除,同时,随激光单脉冲能量的增加,油污去除过程更加激烈迅速。

### 3 工艺实验

#### 3.1 实验准备

利用纳秒脉冲光纤激光器进行冷轧带钢表面冷轧油的激光清洗实验,激光器技术参数如表 2 所示。如图 9 所示,待清洗试样是尺寸为 50 mm × 100 mm × 1 mm 的 DC04 超低碳冷轧钢板。设定激光重复频率为 50 kHz,激光扫描速度为 4000 mm/s,扫描线间距为 0.08 mm,此时激光扫描方向与其垂直方向的搭接率均为 50%。分别设定激光功率为 30, 35, 40 W, 其对应的单脉冲激光能量为 0.6, 0.7, 0.8 mJ。

激光光斑为圆光斑,为实现完全去除油污的效果,需对光斑进行搭接,具体搭接方式如图 10 所示<sup>[19]</sup>。

激光扫描方向(X方向)搭接率  $n_x$  与其垂直方向(Y方向)搭接率  $n_y$  表示为

$$n_x = 1 - \frac{d_x}{2r} = 1 - \frac{v}{2rf}, \quad (9)$$

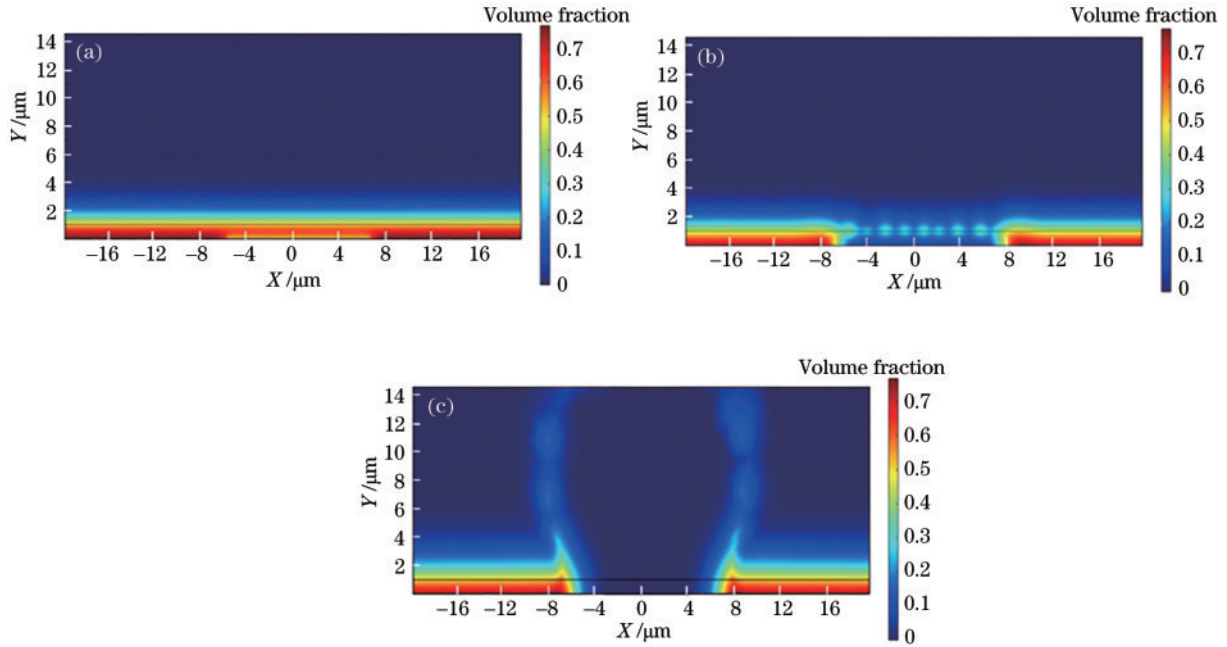


图 8 不同激光单脉冲能量下,油污去除模拟结果。(a) $E=0.6\text{ mJ}$ ; (b) $E=0.7\text{ mJ}$ ; (c) $E=0.8\text{ mJ}$   
 Fig. 8 Simulation results of oil pollution removal under different laser single pulse energies. (a)  $E=0.6\text{ mJ}$ ; (b)  $E=0.7\text{ mJ}$ ; (c)  $E=0.8\text{ mJ}$

表 2 纳秒脉冲光纤激光器的技术参数

Table 2 Technical parameters of nanosecond pulsed fiber laser

Parameter	Value
Wavelength /nm	1064
Maximum average output power /W	200
Repetition rate /kHz	20~100
Pulse width /ns	100
Maximum scanning speed /( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	10000
Spot diameter / $\mu\text{m}$	160

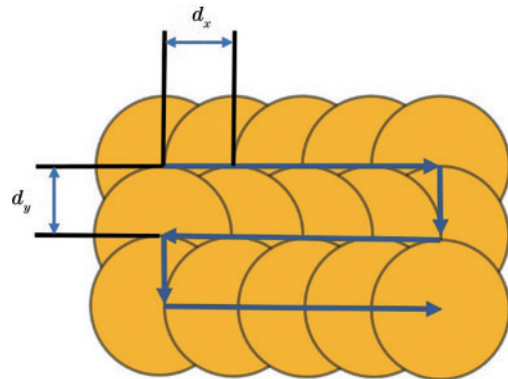


图 10 激光光斑搭接示意图  
 Fig. 10 Schematic diagram of laser spot overlap



图 9 冷轧钢板待清洗试样  
 Fig. 9 Sample of cold rolled steel plate to be cleaned

$$n_y = 1 - \frac{d_y}{2r}, \quad (10)$$

式中: $v$ 为激光扫描速度; $d_x$ 为扫描方向光斑间距; $d_y$ 为扫描线方向光斑间距。

### 3.2 实验结果与分析

#### 3.2.1 激光清洗后基底表面洁净度测试

激光清洗过程中,当激光单脉冲能量为  $0.6\text{ mJ}$  时,激光与钢板及其表面油污相互作用产生较小的火花,清洗后的钢板表面基本没有变化;当激光单脉冲能量为  $0.7\text{ mJ}$  或  $0.8\text{ mJ}$  时,激光与钢板及其表面油污相互作用产生明显的火花,同时会产生一定的噪音,并且,随激光单脉冲能量的增大,激光清洗过程中产生的火花和噪音也会增大。激光清洗后的钢板可以露出洁净的表面,具有明亮的金属光泽。

带钢清洗后表面油污的清洁度可以利用称量法、接触角法、反射率法等多种方法进行测试<sup>[20]</sup>。本文主要采用接触角法与反射率法两种方法对激光清洗后的带钢表面洁净度进行测试。

接触角法测试的主要过程为:将激光清洗后的钢

板浸入干净的去离子水中,通过观察水膜在钢板表面的覆盖率,对钢板表面的洁净度进行表征。若水膜可以覆盖钢板表面,则其表面污染物基本被去除;反之钢板表面仍存在污染物残留。反射率法测试的主要过程为:利用隐形胶带对清洗后的钢板表面进行粘贴,将粘有污染物的胶带粘贴到干净的白纸上,利用反射率测试仪对其反射率进行测试,反射率越高,则表面的洁净度越高,反射率最大值为100%。

如图 11 所示,当激光单脉冲能量为 0.6 mJ 时,激光清洗后钢板表面依然残留较多油污,水膜基本无法附着在钢板表面;当激光单脉冲能量为 0.7 mJ 或

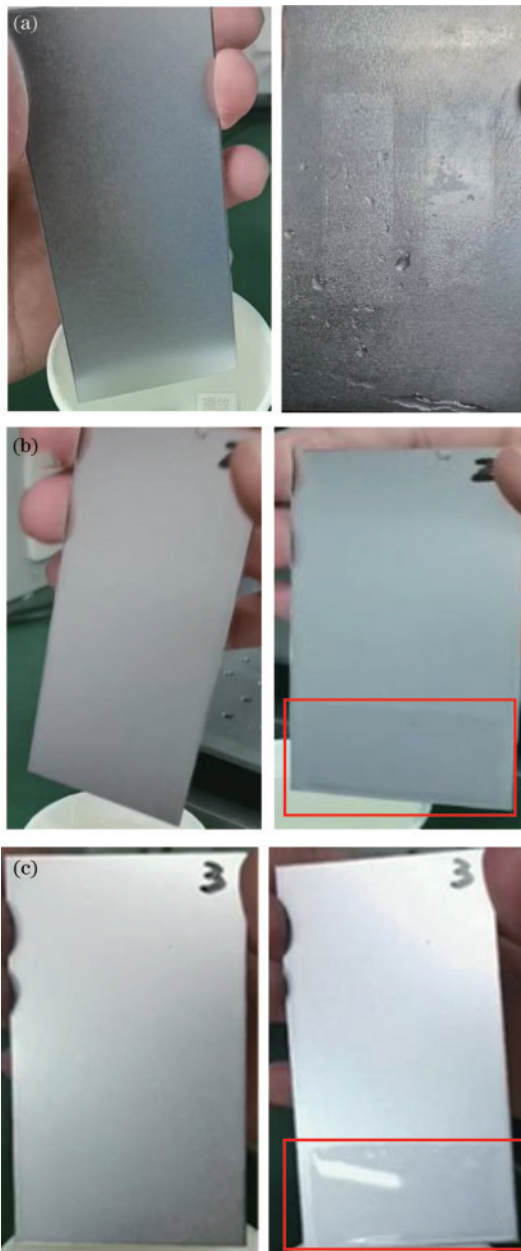


图 11 不同激光单脉冲能量下,激光清洗后钢板表面及水膜覆盖测试结果。(a) $E=0.6$  mJ;(b) $E=0.7$  mJ;(c) $E=0.8$  mJ  
Fig. 11 Surface of steel plate and water film covering after laser cleaning under different laser single pulse energies. (a)  $E=0.6$  mJ; (b)  $E=0.7$  mJ; (c)  $E=0.8$  mJ

0.8 mJ 时,激光清洗后的钢板表面洁净、明亮,水膜基本可以覆盖在钢板表面,表明油污已基本被去除干净。

如图 12 所示,将粘贴过钢板表面油污的胶带粘贴在白纸上,并进行反射率测试。结果表明:未进行过激光清洗的粘贴区域的反射率为 74.1%;当激光单脉冲能量为 0.6 mJ 时,清洗后的粘贴区域的反射率为 76.4%;当激光单脉冲能量为 0.7 mJ 时,清洗后的粘贴区域的反射率为 98.7%;当激光单脉冲能量为 0.8 mJ 时,清洗后的粘贴区域的反射率为 99.5%。因此可以认为,当激光单脉冲能量达到 0.7 mJ 时,带钢表面油污基本上被去除。

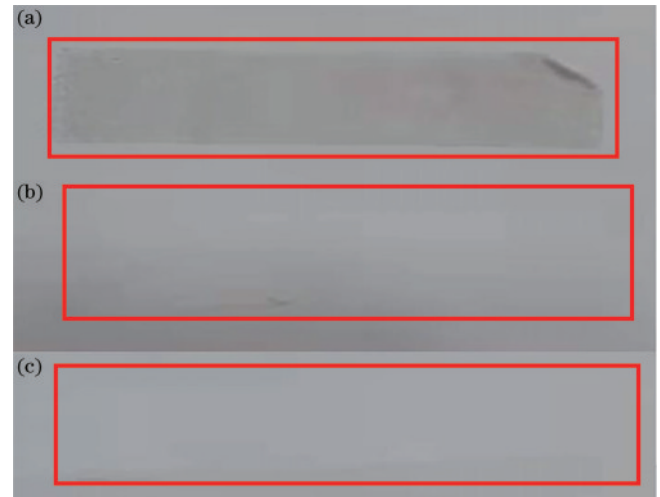


图 12 不同单脉冲能量的激光清洗后,胶带粘贴反射率测试结果。(a) $E=0.6$  mJ;(b) $E=0.7$  mJ;(c) $E=0.8$  mJ  
Fig. 12 Reflectivity test results after laser cleaning with different laser single pulse energies. (a)  $E=0.6$  mJ; (b)  $E=0.7$  mJ; (c)  $E=0.8$  mJ

对于激光清洗技术,在不考虑基底材料损伤的情况下,激光输入能量越大,激光清洗后材料表面污染物的清除率越高。因此,当激光单脉冲能量达到 0.7 mJ 时,冷轧钢板表面的油污基本上被去除,与模拟结果基本一致。

### 3.2.2 基底表面形貌

通常情况下,冷轧钢板经冷轧工序后表面会有一些的粗糙度,有利于提高后续的电镀、涂漆等工艺的膜层附着性能。同时,钢板表面的粗糙结构也会增大附着在钢板表面的油污的清洗难度。为了进一步对激光清洗的效果进行评估,利用放大倍率为  $10\times 100$  的光学显微镜对激光清洗前后的钢板表面进行观测。

如图 13 所示,在显微镜观测下,钢板表面呈现出高低不平的形貌,在较低的沟壑里存在较多的油污附着。当激光单脉冲能量为 0.6 mJ 时,仅有小部分油污可以被去除,这是由于油污的组成成分复杂,其中黏着性较差、沸点较低的部分可以被激光部分去除;当激光单脉冲能量大于等于 0.7 mJ 时,钢板表面的油污基本上被完全去除。

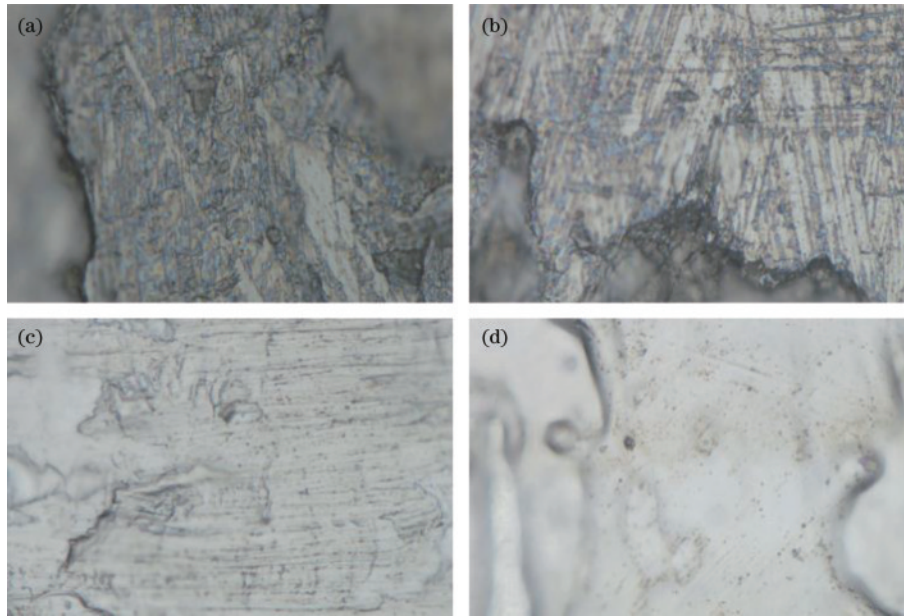


图 13 不同单脉冲能量的激光清洗后的基底表面形貌。(a) $E=0$ ;(b) $E=0.6\text{ mJ}$ ;(c) $E=0.7\text{ mJ}$ ;(d) $E=0.8\text{ mJ}$

Fig. 13 Surface morphologies of substrate after laser cleaning with different laser single pulse energies. (a)  $E=0$ ; (b)  $E=0.6\text{ mJ}$ ; (c)  $E=0.7\text{ mJ}$ ; (d)  $E=0.8\text{ mJ}$

### 3.2.3 光斑搭接率对激光清洗效果的影响

激光清洗过程中,当光斑搭接率过大时,基材在激光作用下会产生明显的热积累,甚至被损伤,同时光斑搭接率越大,激光清洗效率越低;当光斑搭接率过小时,光斑边缘处污染物则可能无法被完全去除。因此,对光斑搭接率对激光清洗效果的影响进行了实验研究。

通过设定不同的激光扫描参数组合进行激光清洗实验,并利用上述方法对激光清洗效果进行评估。最终找到三组可以清洗钢板表面污染物的激光参数,如表 3 所示。通过改变激光扫描速度和激光扫描线间距调整激光光斑搭接率,当光斑搭接率降低至 37.5% 时,激光能量需增大至  $4.47\text{ J/cm}^2$  才能够实现油污的基本去除。这主要是由于激光单脉冲能量的增大导致带钢表面最大温度上升,使能够发生相爆炸效应的温度范围增大,保证了较低搭接率下的激光清洗效果。

表 3 可以去除冷轧带钢表面油污的激光参数

Table 3 Laser parameters for removing oil from cold rolled strip surfaces

Number	Laser power /W	Scanning speed / (mm/s)	Line spacing / mm
1	35	4000	0.08
2	40	4500	0.09
3	45	5000	0.10

另外,由于实验所用纳秒脉冲激光器的脉宽仅为 100 ns,在此时间尺度内激光能量作用在钢板表面产生的热量积累很小,因此激光清洗后冷轧带钢表面光滑且具有金属亮泽,无明显损伤产生,与模拟结果基本相符。

## 4 结 论

利用 COMSOL Multiphysics 多物理场有限元仿真软件建立了纳秒脉冲激光清洗 DC04 冷轧带钢表面冷轧油的有限元模型,实现了单脉冲激光能量作用下材料表面的温度场分布及油污的去除过程的可视化模拟。另外,利用纳秒脉冲光纤激光器对 DC04 冷轧钢板试样表面油污进行了激光清洗实验,并与模拟结果进行了对比,得到了以下结论:1)利用纳秒脉冲激光清洗 DC04 冷轧带钢表面的冷轧油污的主要作用机理为相爆炸机理,该机理可应用于污染物对激光弱吸收而基底材料对激光强吸收的激光清洗中,污染物与基底界面处在高峰值功率密度的激光能量作用下产生爆炸性气化反应,从而使基底表面的污染物被去除;2)固定激光光斑半径为  $80\text{ }\mu\text{m}$ ,激光光斑搭接率为 50%,当激光能量密度大于等于  $3.48\text{ J/cm}^2$  时,激光能量作用下 DC04 冷轧钢板表面的冷轧油污残留基本上可以被去除,且实验结果与模拟结果基本一致;3)当激光能量密度大于  $3.48\text{ J/cm}^2$  时,可以通过适当增大激光扫描速度与扫描线间距来提高脉冲激光清洗的效率。本研究可以为纳秒脉冲激光清洗其他种类材料表面油污的工艺参数确定提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] 贾晓芳. 冷轧带钢电解清洗工艺及其数值模拟研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.  
Jia X F. Study on electrolytic cleaning process of cold rolled strip and its numerical simulation[D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [2] 李九岭, 郑洪道, 汪晓林. 冷轧带钢表面污染物及其对



- 热镀锌的影响[J]. 武钢技术, 2006, 44(3): 36-39.
- Li J L, Zheng H D, Wang X L. Influence of surface contaminants of cold rolled strip on hot dip galvanization [J]. Wuhan Iron and Steel Corporation Technology, 2006, 44(3): 36-39.
- [3] 张天刚, 段俊杰, 刘天翔, 等.  $\gamma$ 向搭接率对铝合金表面复合漆层激光清洗的影响[J]. 中国激光, 2023, 50(16): 1602204.
- Zhang T G, Duan J J, Liu T X, et al. Effect of  $\gamma$ -direction bonding rate on laser cleaning of composite coatings on aluminum alloy surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(16): 1602204.
- [4] 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): 0402010.
- 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): 0402010.
- [5] 蔡晶芳, 周浩, 闫莹, 等. 激光清洗表面疏松绿锈青铜器的阈值研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1114005.
- Cai J F, Zhou H, Yan Y, et al. Study on the threshold of laser cleaning bronze ware with loose green rust on its surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1114005.
- [6] 李鑫炎, 李灿阳, 王丹, 等. 激光扫描速度对 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] Lafargue P E, Chaoui 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 and Coatings Technology, 1998, 106(2/3): 268-276.
- [8] Chen G X, Kwee T J, Tan K P, et al. Laser cleaning of steel for paint removal[J]. Applied Physics A, 2010, 101(2): 249-253.
- [9] Ahn D, Jang D, Park T, et al. Laser removal of lubricating oils from metal surfaces[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(18): 3751-3757.
- [10] 王蔚, 李相锦, 刘伟军, 等. 激光清洗 7075 铝合金阳极氧化膜的工艺参数对表面质量的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 1602020.
- Wang W, Li X J, Liu W J, et al. Effect of process parameters on surface quality of anodic oxide film of 7075 aluminum alloy by laser cleaning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 1602020.
- [11] 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.
- [12] 陈翊坤, 陆安进, 付宁宁, 等. 基于激光清洗技术实现航空油滤维保的工艺研究[J]. 应用激光, 2020, 40(4): 649-656.
- Chen Y K, Lu A J, Fu N N, et al. Research on technology of aviation oil filtration maintenance based on laser cleaning technology[J]. Applied Laser, 2020, 40(4): 649-656.
- [13] 段成红, 池瀚林, 陈晓奎, 等. 石化设备激光清洗应用研究[J]. 应用激光, 2021, 41(4): 826-832.
- Duan C H, Chi H L, Chen X K, et al. Research on application of laser cleaning for petrochemical equipment [J]. Applied Laser, 2021, 41(4): 826-832.
- [14] 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.
- [15] 曾小迪. 基于脉冲光纤激光器的激光除漆技术与装置研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018: 26-29.
- Zeng X D. Research on laser paint removal technology and device based on pulsed fiber laser[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018: 26-29.
- [16] Sharma S, Mandal V, Ramakrishna S A, et al. Numerical simulation of melt hydrodynamics induced hole blockage in Quasi-CW fiber laser micro-drilling of TiAl6V4[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 131-148.
- [17] Courtois M, Carin M, Le Masson P, et al. A complete model of keyhole and melt pool dynamics to analyze instabilities and collapse during laser welding[J]. Journal of Laser Applications, 2014, 26(4): 042001.
- [18] Khalil C, Marya S, Racineux G. Construction of physical welding windows for magnetic pulse welding of 5754 aluminum with DC04 steel[J]. International Journal of Material Forming, 2021, 14(5): 843-854.
- [19] 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): 1002012.
- Guo Z H, Zhou J Z, Meng X K, et al. Nanosecond-pulsed-laser paint stripping of HT250 gray cast iron[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002012.
- [20] 王宇, 贾晓芳, 刘晓魁, 等. 冷轧带钢表面残留物检测方法的研究现状[J]. 表面技术, 2010, 39(4): 83-86.
- Wang Y, Jia X F, Liu X K, et al. Research status of detection methods of surface remainders on cold rolled strip[J]. Surface Technology, 2010, 39(4): 83-86.