



## 基于热烧蚀效应的激光清洗仿真模型研究 (特邀)

郭嘉伟 蔡和 韩聚洪 罗清 杨蛟 安国斐 宋迪 王佳琪 王液

### Simulation model of laser cleaning based on thermally-induced ablation effects (*invited*)

Guo Jiawei, Cai He, Han Juhong, Luo Qing, Yang Jiao, An Guofei, Song Di, Wang Jiaqi, Wang You

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220779>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 38CrMoAl材料表面污染物激光清洗技术

Laser cleaning technology of 38CrMoAl material surface pollutants

红外与激光工程. 2018, 47(7): 706004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0706004>

#### 基于图像的激光微尺度烧蚀质量估算方法

Estimation method of laser micro-scale ablation quality based on image

红外与激光工程. 2021, 50(S2): 20210297 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210297>

#### 能量密度对毫秒脉宽激光烧蚀铝靶物质迁移机制的影响

Effect of energy density on material migration mechanism in millisecond laser ablation of aluminum target

红外与激光工程. 2021, 50(S2): 20210264 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210264>

#### 激光二极管端面抽运梯度浓度掺杂介质激光器热效应的有限元法分析

Finite element method analysis of thermal effect in gradient dopant concentration medium laser end-pumped by laser diode

红外与激光工程. 2019, 48(11): 1105004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1105004>

#### 玻璃钢激光烧蚀碳化致微波传输衰减的数值模拟

Numerical simulation of ablation and carbonization of GFRP irradiated by laser induced microwave transmission decay

红外与激光工程. 2021, 50(12): 20210137 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210137>

#### 飞秒激光多脉冲烧蚀金属铁的数值模拟

Numerical simulation of femtosecond laser multi-pulse ablation of metal iron

红外与激光工程. 2019, 48(7): 706002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0706002>

## 基于热烧蚀效应的激光清洗仿真模型研究 (特邀)

郭嘉伟, 蔡 和, 韩聚洪, 罗 清, 杨 蛟, 安国斐, 宋 迪, 王佳琪, 王 澈\*

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:** 为研究在基于热烧蚀效应的激光清洗中激光参数对清洗效果的影响, 根据热烧蚀效应原理、傅里叶热传导方程以及能量守恒定理, 使用有限元分析软件建立了热烧蚀动态能量守恒的二维激光清洗仿真模型。在该模型中使用了虚拟第三类边界条件, 将薄层-基底系统中的激光烧蚀热功率密度与被烧蚀污渍层边界的法向移动速度进行关联, 实现了污渍层烧蚀潜热消耗量与激光烧蚀能量之间的动态能量守恒, 明确了质量损失与能量消耗的数学关系, 使所建立的模型更加理论自恰和精确可靠。利用该模型理论分析了光斑吸收功率、光斑直径、扫描速度以及扫描能量密度对清洗效果的影响, 结果表明: 污渍平均残留厚度随光斑吸收功率和扫描能量密度增大而减小, 且减小的速率会逐渐变慢, 当激光功率过大时, 基材会出现损伤; 污渍平均残留厚度随光斑直径和扫描速度的增大而变大, 但减小光斑直径和扫描速度会降低清洗效率。提出了根据污渍层物性参数与扫描能量密度的对应关系优化激光参数的方法, 并对非平整表面污渍层进行了多次不间断扫描的仿真分析, 得到了清洗效果随扫描次数的变化规律。该研究结果对激光清洗设备的方案设计、优化改进和使用选型具有一定的指导意义。

**关键词:** 激光清洗; 热烧蚀; 有限元分析; 薄层-基底系统; 动态能量守恒

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220779

## Simulation model of laser cleaning based on thermally-induced ablation effects (*invited*)

Guo Jiawei, Cai He, Han Juhong, Luo Qing, Yang Jiao, An Guofei, Song Di, Wang Jiaqi, Wang You\*

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to study the influence of laser parameters on the performance of laser cleaning based on thermal ablation effects, considering the working mechanism of thermally-induced ablation, Fourier heat conduction equation, and energy conservation theorem, a finite element analysis (FEA) software is used to establish a two-dimensional laser cleaning simulation model of dynamic energy conservation during the thermal ablation. In the simulation model, there is a mathematical relationship between the laser ablation intensity of the thin layer-base system and the normal velocity of the paint layer boundary, by using the virtual Robin boundary condition in the Fourier heat conduction equation. The simulation reflects the dynamic conservation of energy between the laser ablation energy and the latent heat consumption inside paint layers, which confirms the mathematical relationship between the mass loss and the energy consumption, and the simulation results become more precise and reliable. Such a simulation model is used to analyze the effects of the laser power, spot diameter,

收稿日期: 2022-11-03; 修订日期: 2022-12-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0405100)

作者简介: 郭嘉伟, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事激光清洗与激光器热效应方面的研究。

通讯作者: 王澈, 男, 研究员, 博士, 主要从事激光应用技术和新型激光器方面的研究。

scanning speed, and scanning energy density on the cleaning performance. The simulation results show that the average residual thickness of a paint layer decreases with the increase of the laser power and scanning energy density, and the decrease tendency gradually slows down. When the laser power becomes too large, the metal base will be damaged. The average residual thickness of the paint layer increases with the spot diameter and scanning speed. However, reducing the spot diameter and scanning speed is harmful to enhance the cleaning efficiency. According to the relationship between the physical parameters of the paint layer and the scanning energy density, the optimization protocol of laser cleaning parameters has been proposed by considering both the cleaning performance and the cleaning efficiency. The simulation model is also used to analyze the cleaning performance of each scanning of an uneven surface paint layer by the uninterrupted multiple scanning. The study in this paper could be helpful for the design of laser cleaning devices as well as the optimization of laser parameters.

**Key words:** laser cleaning; thermal ablation; FEA; thin layer-base system; dynamic energy conservation

## 0 引言

激光清洗技术相比传统工业清洗技术具有诸多优点<sup>[1-2]</sup>,因此激光清洗技术拥有巨大应用潜力和广泛应用前景,国内外针对该技术进行大量理论和实验研究<sup>[3-10]</sup>。仿真模型研究是激光清洗技术机理研究中的核心组成部分之一。激光清洗的机理研究已有较成熟的研究结果,能够从微观层面解释烧蚀效应、振动效应和等离子体冲击波等清洗机理<sup>[3,6-8,10]</sup>,但依然难以直接定量计算出宏观应用场景的清洗效果,需要使用合适的激光清洗仿真模型才能定量计算清洗的效果,据此,可通过理论研究结果直接指导实验。

目前对于激光清洗仿真模型的研究主要有两种途径:(1)从基础理论出发,使用数学解析方法得到一些特定限制条件下的解析结果<sup>[11-13]</sup>。但由于其限制和假设条件过多,数学模型过于理想,只能计算一些规范化和理想化的简单加工场景,很难直接应用于实际的工业场景,可操作性和实用性不强。(2)使用离散方法(如有限元方法)建立激光清洗的数值仿真模型<sup>[14-18]</sup>。借助当前成熟的有限元分析软件和性能强大的计算机硬件,可建立并求解具有复杂几何、非常数材料物性、非均匀非线性边界条件、多物理场耦合等特征的并接近实际应用场景的仿真模型。周桂莲<sup>[14]</sup>等使用 ANSYS 软件模拟了激光清洗模具过程中模具表面的温度变化。施曙东<sup>[15]</sup>使用 COMSOL Multiphysics 软件建立了适用于窄脉冲激光清洗的三层吸收界面烧蚀振动干式激光清洗理论模型。

张志研<sup>[17]</sup>等使用 ANSYS 软件建立了二维扫描的脉冲激光热烧蚀激光清洗仿真模型。高辽远<sup>[18]</sup>等使用 COMSOL Multiphysics 软件建立了移动纳秒脉冲激光清洗的有限元模型。

上述研究工作所建立的激光清洗仿真模型都能够较好地模拟污渍层和基材中的温度分布与激光功率、光斑尺寸、扫描速度之间的关系,但存在着以下两点不足:(1)模型中只考虑污渍层的温度是否达到烧蚀温度点,而忽略其烧蚀潜热对激光能量的实时消耗,未达到潜热与显热之间的能量守恒,理论上无法自洽。(2)模型中污渍层的烧蚀去除量依赖于求解时间步长的选择,不能显示实时的烧蚀去除效果,且在每个时间步长后都要手动重新加载上一个时间步长烧蚀效果的几何模型和边界条件,求解过程较为繁琐,求解精度也无法保证。

针对上述问题,文中提出了基于污渍层烧蚀潜热消耗量与激光烧蚀能量动态能量守恒的热烧蚀激光清洗仿真模型的建立方法,使用 COMSOL Multiphysics 软件建立了该热烧蚀动态能量守恒的二维激光清洗仿真模型。利用该仿真模型分析激光相关参数与污渍层清洗效果之间的定性和定量关系,为指导工业激光清洗场景中激光清洗设备的设计优化和激光参数的选择具有一定指导意义。

## 1 仿真模型的建立

### 1.1 薄层-基底系统

通常,在仿真模型中采用薄层-基底系统描述工

业清洗中最常见的膜层型污渍(如漆层、锈层、油污层等)<sup>[13,15]</sup>,如图 1 所示。其中,薄层为待清洗的污渍层,忽略其物质成分和微观结构的不均匀性,将其近似为拥有特定物性参数的微米~亚毫米级厚度的均匀固体薄层;基底为需要在清洗后被暴露出表面而又没受到损伤的基材,通常为金属材料,厚度为毫米~米级;激光经聚焦后辐照在薄层上,形成具有特定功率密度分布的激光光斑,并按特定的轨迹和速度进行扫描。

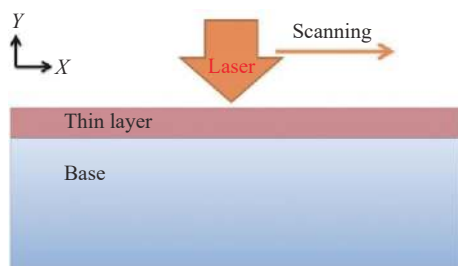


图 1 二维薄层-基底系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of two-dimensional thin layer-base system

激光被薄层吸收的光强  $I_A$  为:

$$I_A = (1 - R) \cdot I \quad (1)$$

式中:  $I$  为辐照在薄层表面的光强,其在二维模型中的单位为  $W/m$ ,其分布为  $I(x)$ ;  $R$  为薄层表面对激光的反射率,文中假设  $R$  为定值。

由于被反射的激光能量对清洗没有贡献,这里只考虑被薄层吸收的光强  $I_A$ 。假设薄层材料对激光的吸收系数非常大,绝大部分激光能量在薄层表面和近表面区域被吸收并全部转化为热能,则薄层表面的生热功率密度  $\Phi_A$  为:

$$\Phi_A = I_A \quad (2)$$

二维薄层-基底系统中的温度分布可以用无内热源的傅里叶导热定律来描述:

$$\frac{c\rho}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (3)$$

式中:  $T$  为温度;  $t$  为时间;  $\rho$  为密度;  $c$  为比热容;  $k$  为热导率。

求解上述方程还需要明确边界条件。二维薄层-基底系统存在着两种边界:激光辐照加热区域的薄层表面边界和其他未被激光辐照加热的表面边界。假设二维薄层-基底系统处于自然大气环境中,则其所

有表面都存在自然对流换热,所对应的第三类边界条件为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{air}(T - T_{air}) \quad (4)$$

式中:  $n$  为边界法向;  $T_{air}$  为空气温度;  $h_{air}$  为自然对流换热系数。

在激光辐照加热区域的薄层表面边界上还存在着生热功率密度  $\Phi_A$ ,所对应的第二类边界条件为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \Phi_A \quad (5)$$

由于自然对流换热密度远远小于激光生热功率密度,在激光辐照加热区域的薄层表面边界可以忽略公式(4)。且根据公式(2),激光辐照加热区域的薄层表面边界条件可表示为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = I_A \quad (6)$$

## 1.2 热烧蚀效应中的动态能量守恒

1.1 节中,通过傅里叶导热定律和对应的边界条件将薄层表面光强分布  $I(x)$  与二维薄层-基底系统的温度分布  $T(x,y)$  联系起来,但这只适用于从激光开始加热薄层到即将开始烧蚀这段时间温度场的求解。

热烧蚀效应的原理是污渍层吸收激光能量后升温,当污渍层某处温度超过其烧蚀温度  $T_A$  时,该处污渍层就会被迅速烧蚀消除,其所涉及的物理化学反应包括但不限于气化、燃烧、分解等<sup>[5,8,13,15,18]</sup>,其中既有放热过程也有吸热过程,但吸热过程占据主要地位。将单位质量的上述吸收热量指定为污渍层的烧蚀潜热  $H_A$ ,单位为  $J/kg$ ,其与烧蚀温度  $T_A$  都是污渍层的物性参数。由于工业应用中污渍层的微观结构、组分以及热烧蚀物理化学反应的复杂性,其烧蚀潜热  $H_A$  难以通过精确理论计算或直接测量得到,通常由实验数据或工程经验反推估算获得。

从能量守恒的角度分析污渍层达到烧蚀温度  $T_A$  后的热烧蚀动力学过程。污渍层表面的生热来源于被吸收的光强  $I_A$ ,该生热存在着两个消耗的途径:(1)向温度低于该处的区域传导,造成其他区域的温度改变,其过程可由公式(3)、(4)、(6)描述;(2)消耗该处污渍层的烧蚀潜热  $H_A$ ,造成污渍层质量的减少,直观体现为污渍层厚度的减小。由于膜层型污渍的热导率通常都较低,假设当污渍层温度达到或超过烧蚀

温度  $T_A$  后, 激光生热对污渍层烧蚀潜热  $H_A$  的消耗速率远远大于激光生热向温度更低区域的传导速率, 即激光生成的热量几乎全部消耗于该处污渍层烧蚀潜热  $H_A$ 。因此, 二维薄层-基底系统中热烧蚀过程中激光生热与烧蚀潜热  $H_A$  的动态能量守恒过程可描述为:

$$V_n = \frac{I_A}{\rho \cdot H_A} \quad (7)$$

式中:  $V_n$  为被污渍层表面边界沿向内法向的移动速度。公式 (7) 只有在满足下式时才成立:

$$T \geq T_A \quad (8)$$

在公式 (7)、(8) 所描述的热烧蚀动态能量守恒过程中, 污渍层被激光加热达到或超过烧蚀温度  $T_A$  后, 污渍层厚度减小的法向速度与被吸收的激光光强  $I_A$  成正比。

为说明热烧蚀动态能量守恒过程, 引入 1.1 节中二维薄层-基底系统温度场的数学描述, 需要再增加一个第三类边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_A (T - T_A) \quad (9)$$

式中:  $h_A$  为烧蚀潜热消耗, 虚拟换热系数, 单位为  $W/(m^2 \cdot K)$ 。其取值为:

$$h_A = \begin{cases} 0: T < T_A \\ 10^8: T \geq T_A \end{cases} \quad (10)$$

$h_A$  的意义为: 当未达到烧蚀温度  $T_A$  时, 烧蚀潜热  $H_A$  不发生消耗; 当温度达到或超过烧蚀温度

$T_A$  时, 烧蚀潜热  $H_A$  将以极大的速率被消耗。其中,  $h_A$  取值  $10^8$  只是人为设定的极大值, 不具有唯一性, 符合假设“当污渍层温度达到或超过烧蚀温度  $T_A$  后, 激光生热对污渍层烧蚀潜热  $H_A$  的消耗速率远远大于激光生热向温度更低区域的传导速率”, 此时  $h_A$  不涉及传热学意义的换热过程, 但又具有换热系数的数学形式, 其取值范围与常规传热学意义的换热系数有很大不同, 故称  $h_A$  为“虚拟”换热系数, 公式 (9) 亦称为虚拟第三类边界条件。

将公式 (6)、(7)、(9) 相结合, 消去  $I_A$  和  $-k(\delta T/\delta n)$ , 则得到:

$$V_n = \frac{h_A (T - T_A)}{\rho \cdot H_A} \quad (11)$$

### 1.3 热烧蚀动态能量守恒的二维激光清洗仿真模型

结合公式 (3)、(4)、(6)、(9)~(11), 利用 COMSOL Multiphysics 多物理场有限元分析软件中的固体传热模块和变形几何模块即可建立热烧蚀动态能量守恒的二维激光清洗仿真模型, 如图 2 和图 3 所示。

该模型从厚度坐标 ( $Y$  轴) 零点分层, 上为污渍层, 厚度 0.18 mm; 下为基材, 厚度为 2 mm; 模型宽度为 4 mm。使用自由三角形非结构化网格进行网格划分, 并将污渍层近表面处网格尺寸细化至 0.025 mm。模型中正上方边界为激光烧蚀边界, 其余边界为自然对流散热, 环境温度和初始温度均为 20 °C。不失一般性, 设定污渍层为丙烯酸脂漆, 基材为铝 6061, 其物性参数如表 1 所示<sup>[17]</sup>。

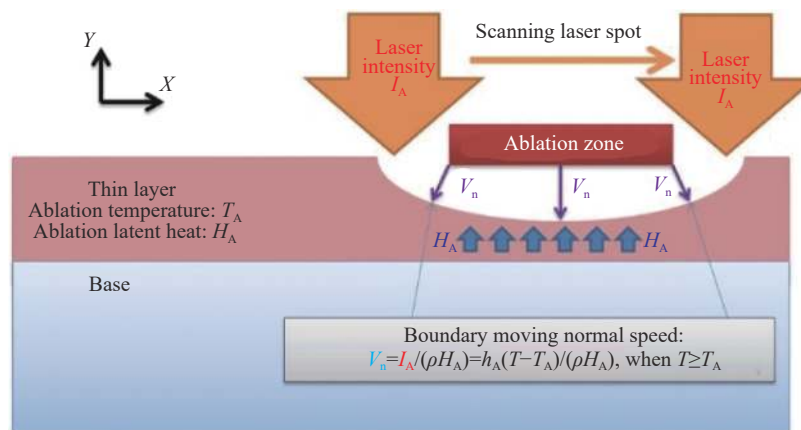


图 2 热烧蚀动态能量守恒的二维激光清洗仿真模型原理示意图

Fig.2 Working mechanism of a two-dimensional laser cleaning simulation model of dynamic energy conservation during the thermal ablation



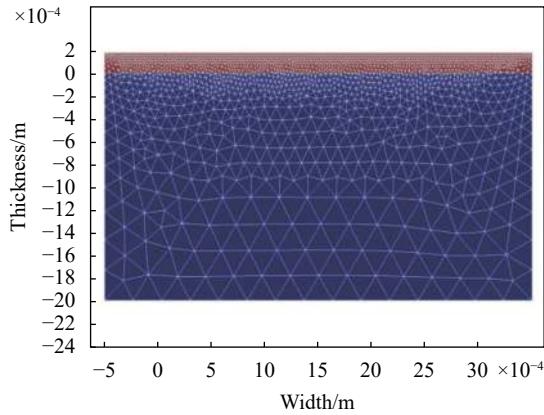


图 3 二维激光清洗仿真模型的几何结构和网格划分

Fig.3 Geometry and mesh of a two-dimensional laser cleaning simulation model

表 1 热烧蚀动态能量守恒的二维激光清洗仿真模型的材料物性参数

Tab.1 Physical parameters of materials in a two-dimensional laser cleaning simulation model of dynamic energy conservation during the thermal ablation

	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$k/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$c/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$T_A/^\circ\text{C}$	$H_A/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Acrylic paint	1450	0.30	2.5	300	1150
Al6061	2690	170	1.1	650	10870

### 1.4 仿真清洗效果的定性和定量评价

在使用 1.3 节的仿真模型进行仿真分析之前, 还需确立仿真结果的定性和定量评价标准。根据激光参数和扫描速度的不同, 可能会出现四类清洗结果, 如图 4 所示, 从左到右依次为: (1) 不充分, 没有清洗干净, 有一整层残留污渍; (2) 不均匀, 有些地方干净, 有些地方存在残留污渍; (3) 干净, 无残留、均匀、无损伤, 是最理想的清洗效果; (4) 过度清洗, 没有污渍残留, 但基材也被损伤。

上述这四类清洗效果只是抽象化的定性描述, 在实际应用场景中最可能出现的是上述四类清洗效果的混合情况, 如图 5 所示, 需要使用定量的评价参数对清洗效果进行描述和评价。

设定三个定量评价参数对仿真清洗效果进行描述和评价。

(1) 平均污渍残留厚度  $W_m$ :

$$W_m = \frac{\int_0^L W(x) dx}{L} \quad (12)$$

式中:  $W(x)$  为污渍层残留厚度分布;  $L$  为污渍层表面沿宽度方向扫描距离。

(2) 污渍残留不均匀度  $W_{\text{RMS}}$ :

$$W_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\int_0^L [W(x) - W_m]^2 dx}{L}} \quad (13)$$

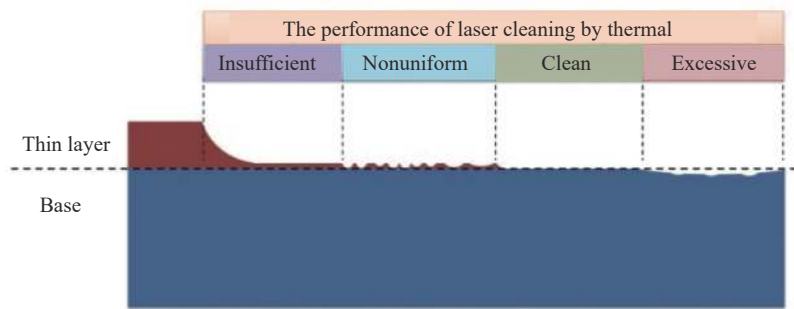


图 4 清洗效果的四类定性描述

Fig.4 Four kinds of typical cleaning statuses

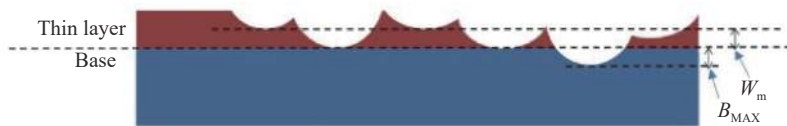


图 5 清洗效果的混合情况

Fig.5 Hybrid cleaning statuses

(3) 基材损伤度  $B_{MAX}$ : 基材的最大烧蚀深度。

## 2 仿真结果及分析

在上述激光清洗仿真模型中设定激光光源为一台声光调  $Q$  准连续 Nd:YAG 激光器, 输出波长  $1.06 \mu\text{m}$ , 重频  $20 \text{ kHz}$ , 脉宽  $140 \text{ ns}$ , 输出功率  $P$  的范围为  $250 \sim 1250 \text{ W}$ , 功率密度呈高斯分布, 聚焦光斑直径  $D$  为高斯直径, 其范围为  $0.8 \sim 1.6 \text{ mm}$ 。

假定模型中对该激光的表面反射率  $R$  为  $20\%$ , 根据公式 (1) 并忽略光学系统的传输损耗, 被辐照表面对光斑的吸收功率  $P_A$  为:

$$P_A = \int_L I_A dx = \int_L (1-R) I dx = (1-R)P \quad (14)$$

聚焦光斑通过微机电扫描镜在被辐照表面高速扫描, 沿  $X$  轴的扫描速度  $V_{scan}$  为  $1 \sim 5 \text{ m/s}$ 。由于在单程扫描起始位置 ( $X=0 \text{ mm}$ ) 和结束位置 ( $X=3.5 \text{ mm}$ ) 上只进行了呈高斯分布光束的半边扫描, 故这两个位置附近的实际光斑吸收功率小于  $P_A$  的设定值, 因此只取  $X$  轴上  $1 \sim 2.5 \text{ mm}$  扫描段来评价清洗效果。

### 2.1 $P_A$ 、 $D$ 、 $V_{scan}$ 单独变化时对清洗效果的影响

在模型中, 当  $P_A$ 、 $D$ 、 $V_{scan}$  其中任何一个参数发生变化时, 另外两个参数保持不变 (不变值分别为  $600 \text{ W}$ ,  $1 \text{ mm}$ ,  $2 \text{ m/s}$ ), 进行单次扫描, 可得到  $P_A$ 、 $D$ 、 $V_{scan}$  分别单独变化时对清洗效果的影响, 如图 6 所示。

如图 6(a) 所示, 在  $P_A$  较小时,  $W_m$  与  $P_A$  呈负线性关系; 在  $P_A$  变大时,  $W_m$  随  $P_A$  增大而减小的速率逐渐变慢。这是由于污渍层热导率远远低于基材, 当  $W_m$  尚且足够厚时, 污渍残留部分表现为巨大热阻, 阻碍激光生热向下方基材逸散, 使  $P_A$  只能用于消耗污渍层  $H_A$ ; 而金属基材的热导率较高, 其厚度也较大, 金属基材表现为一个巨大的热沉, 当  $W_m$  很薄时, 热阻也很小, 无法再有效阻碍  $P_A$  向下方基材逸散, 使  $P_A$  部分逸散至基材, 能用于消耗污渍层  $H_A$  的  $P_A$  减少, 最终表现为  $W_m$  随  $P_A$  增大而减小的速率变慢。

如图 6(b) 所示, 由于  $P_A$  保持不变,  $I_A$  呈高斯分布, 所以如果  $D$  越大,  $I_A$  在高斯分布的中心区域就越小, 这将导致该区域污渍层升温到  $T_A$  的速度越慢, 则通过热传导逸散到其他区域的  $P_A$  就越多, 造成能用

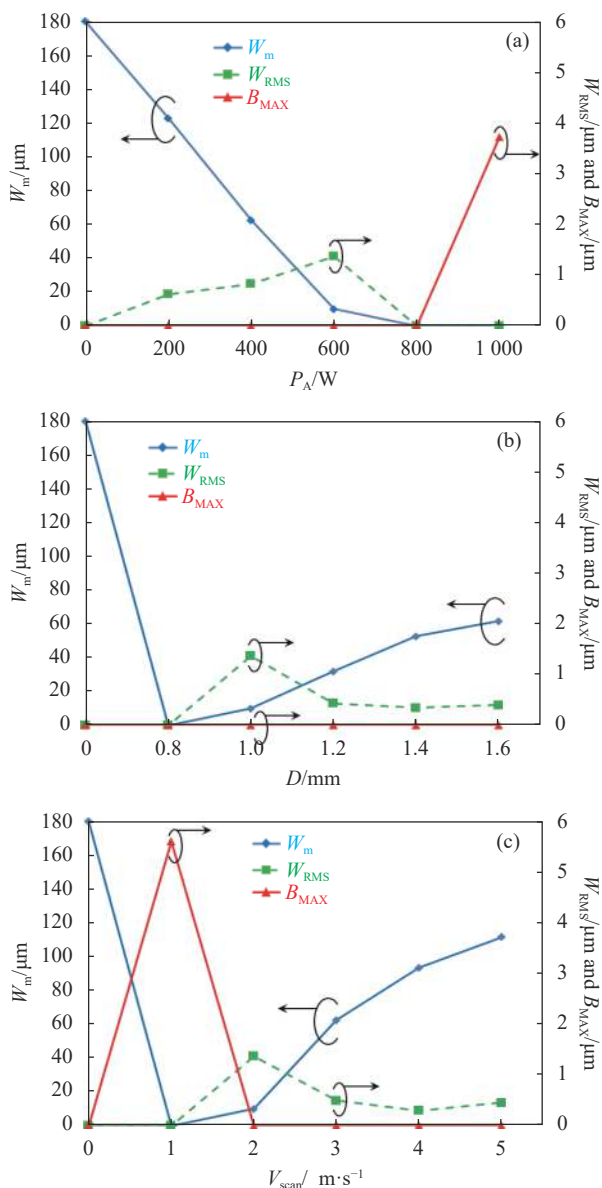


图 6 (a)  $P_A$ 、(b)  $D$ 、(c)  $V_{scan}$  变化对清洗效果的影响

Fig.6 Effect of (a)  $P_A$ , (b)  $D$ , (c)  $V_{scan}$  change on cleaning effect

于消耗污渍层  $H_A$  的  $P_A$  也越少, 故  $W_m$  就越大。但减小  $D$  意味着单次扫描的清洗面积就越小, 清洗效率就会降低。

如图 6(c) 所示, 由于  $P_A$  和  $D$  保持不变,  $V_{scan}$  越大, 单位长度污渍层表面所吸收的  $P_A$  就越小, 能用于消耗该单位长度内  $H_A$  的  $P_A$  也越少, 故  $W_m$  就越大。但  $V_{scan}$  越小也意味着单次扫描的耗时会越长, 清洗效率也会降低; 且  $V_{scan}$  为  $1 \text{ m/s}$  过小时,  $B_{MAX}$  为  $5.6 \mu\text{m}$ , 基材出现了明显损伤。

### 2.2 光斑扫描能量密度 $E_{XS}$ 对清洗效果的影响

定义光斑扫描能量密度  $E_{XS}$  为激光光斑沿  $X$  方

向进行单次扫描时在单位长度上被累计吸收的能量:

$$E_{XS} = \frac{Q_{A\_L}}{L} = \frac{P_A t_{scan\_L}}{L} = \frac{P_A \left( \frac{L}{V_{scan}} \right)}{L} = \frac{P_A}{V_{scan}} \quad (15)$$

式中:  $Q_{A\_L}$  为扫描距离  $L$  上单次扫描所累计吸收的能量;  $t_{scan\_L}$  为扫描经过  $L$  所用的时间;  $E_{XS}$  为  $P_A$  与

$V_{scan}$  的比值, 单位为  $J/m$ 。

设置  $E_{XS}$  为 200、300、400  $J/m$ , 每个  $E_{XS}$  包含 200~1000 W 五个  $P_A$  和对应的  $V_{scan}$ ,  $D$  为 1 mm, 进行单次扫描, 可得到  $E_{XS}$  变化对清洗效果的影响, 如图 7 所示 (上述计算结果中  $B_{MAX}$  都为 0  $\mu m$ , 故没有在图中绘出  $B_{MAX}$  曲线)。

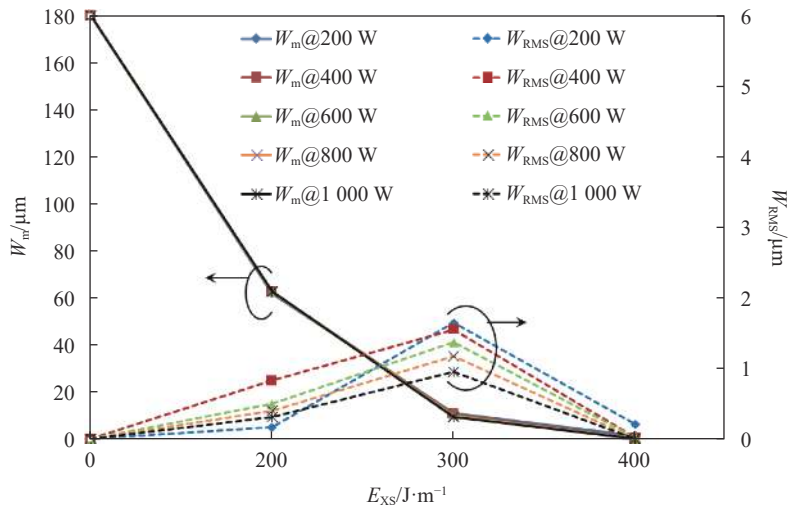


图 7  $E_{XS}$  变化对清洗效果的影响

Fig.7 Effect of  $E_{XS}$  change on cleaning effect

$W_m$  随  $E_{XS}$  的增大而减小, 并且呈现出逐渐饱和的趋势,  $W_{RMS}$  均很小, 且  $P_A$  (以及对应的  $V_{scan}$ ) 的变化几乎不影响  $W_m$ , 对  $W_{RMS}$  的影响也十分有限。这是由于如果忽略激光生热的逸散,  $E_{XS}$  就近似等于污渍层升温吸热与烧蚀潜热之和的能量消耗密度, 两者之间存在如下关系:

$$E_{XS} \geq [c(T_A - T_0) + H_A] \rho (W_0 - W_m) D_Z \quad (16)$$

式中:  $T_0$  和  $W_0$  分别为污渍层的初始温度和初始厚度;  $D_Z$  为烧蚀光斑在  $Z$  方向 (二维模型中被简化的维度) 上的等效宽度, 其值为  $[\sqrt{(\pi/8)}] D$ 。  $D_Z$  的取值需要满足高斯分布中心高度与  $D_Z$  的乘积等于高斯分布在  $Z$  方向的积分, 如图 8 所示。  $D$  越大, 在  $Z$  方向的清洗效率就越高, 但也意味着需要更大的  $E_{XS}$  以保证清洗效果。

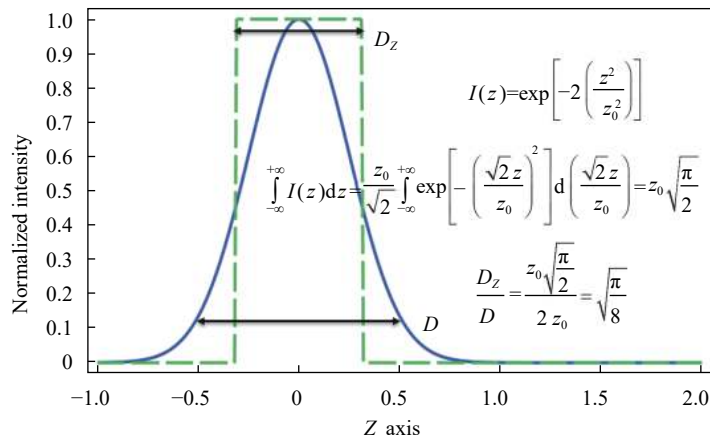


图 8  $D_Z$  与  $D$  的关系

Fig.8 Relationship between  $D_Z$  and  $D$



公式 (16) 表明,  $E_{XS}$  越大,  $W_m$  就越小, 但随着  $W_m$  变小, 残留污渍层表面与基材之间的热阻也越小, 则激光生热向基材逸散的比例就越大, 故  $W_m$  呈现出逐渐饱和的趋势。

虽然在相同的  $E_{XS}$  下,  $P_A$  的变化几乎不影响  $W_m$ , 但提高  $P_A$  会使  $V_{scan}$  同步提高, 这将缩短单位长度污渍层表面的激光辐照时间。其结果为: 激光生热向基材逸散的比例减少, 同时, 激光清洗的效率也会增加, 这对清洗效果具有正面作用。

根据上述分析, 在清洗已知物性参数的污渍层时, 公式 (16) 可为优化选择激光光斑参数提供理论参考: 根据污渍层的厚度 (或单次扫描能烧蚀掉的期望厚度) 和物性参数以及激光光斑直径计算出  $E_{XS}$  的下限; 在满足  $E_{XS}$  下限的  $P_A$  与  $V_{scan}$  的组合中优先选择更大的  $P_A$  以实现更高的清洗效率; 若最大的  $P_A$  仍无法满足  $E_{XS}$  的下限, 则应在减小  $D$  后重新计算。

### 2.3 对非平整表面的多次扫描清洗效果分析

为了更贴近模拟真实的清洗场景, 在模型中污渍层表面添加了厚度的起伏, 该起伏的波峰值和波谷值均设定为  $36 \mu\text{m}$ , 且污渍层的平均厚度与之前相同, 进行不间断的三次往返扫描,  $P_A$ 、 $D$ 、 $V_{scan}$  分别为  $300 \text{ W}$ 、 $1 \text{ mm}$ 、 $2 \text{ m/s}$ , 仿真结果如图 9 和图 10 所示。

在模型中, 三次扫描之间没有时间间断, 每次扫描所使用的温度场初值均为上一次扫描结束时的温度场分布。但由于污渍层热导率极低, 且比热容不大, 只有靠近表面部分的温度能够被加热到很高, 故其依靠自身热容存储的热量十分有限, 对下一次扫描的贡献很小。

由于在模拟中  $E_{XS}$  的设定值较小, 只有  $150 \text{ J/m}$ , 第一次扫描无法清除全部漆层,  $W_m$  为  $87 \mu\text{m}$ , 平均净烧蚀深度  $93 \mu\text{m}$ ;  $W_{RMS}$  为  $20 \mu\text{m}$ , 与清洗前基本相同, 不均匀性并没有得到改善。如图 9(b) 所示, 污渍层厚度整体减小, 但表面的起伏形态没有明显变化。

第二次扫描清除了绝大部分漆层,  $W_m$  为  $9 \mu\text{m}$ , 由于接近基材后能量逸散比例增加, 平均净烧蚀深度较上一次减小为  $78 \mu\text{m}$ ;  $W_{RMS}$  降为  $6.9 \mu\text{m}$ , 不均匀性得到了改善。如图 9(c) 所示, 污渍层厚度整体残留极小, 原凹陷区域已经露出基材, 原凸起区域仍有凸起形态特征, 但整体表面起伏形态已不再明显。

第三次扫描可清除全部漆层,  $W_m$  和  $W_{RMS}$  均为

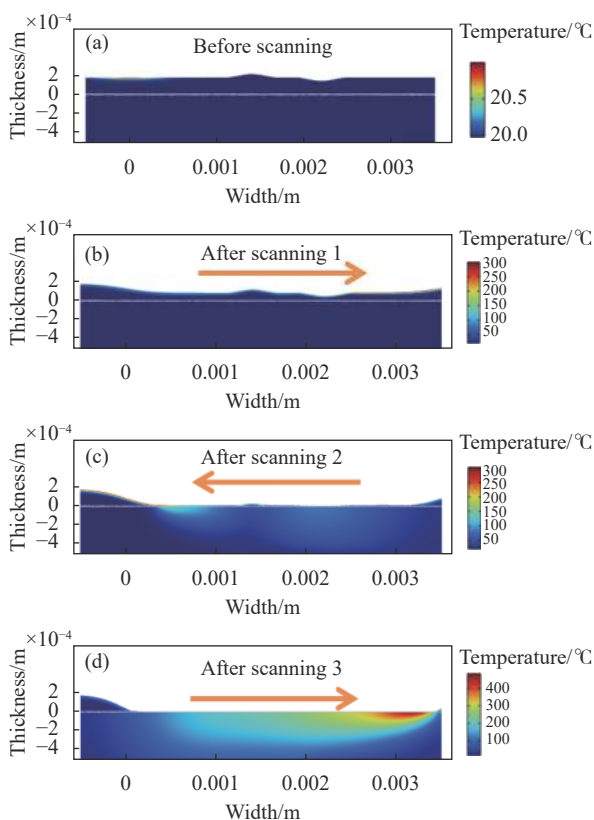


图 9 非平整表面的多次扫描清洗效果。(a) 扫描前; (b) 一次扫描后; (c) 二次扫描后; (d) 三次扫描后

Fig.9 Cleaning results for uneven surface by multiple scanings.

(a) Before scanning; (b) After scanning 1; (c) After scanning 2; (d) After scanning 3

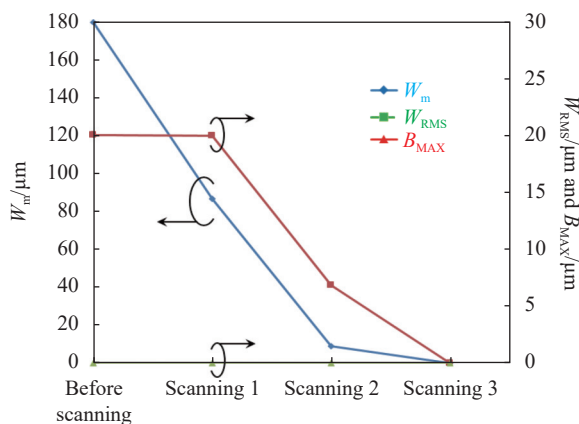


图 10 非平整表面的每次扫描清洗效果

Fig.10  $W_m$ ,  $W_{RMS}$ ,  $B_{MAX}$  versus each scanning of uneven surface

$0 \mu\text{m}$ , 漆层无残留, 不均匀性消失。如图 9(d) 所示, 扫描过的表面十分平整, 表面起伏形态完全消失, 且模型最高温度已超过污渍层的  $T_A$ , 但尚未达到基材的  $T_A$ , 这表明污渍层被清除干净, 且基材无损伤。

### 3 结 论

基于薄层-基底系统和傅里叶导热定律,考虑激光生热对污渍层烧蚀潜热的消耗速率与污渍层体积的减少速率之间的动态能量守恒,利用有限元分析软件建立了热烧蚀动态能量守恒的二维激光清洗仿真模型。使用该模型理论分析了光斑吸收功率、光斑直径、扫描速度以及扫描能量密度对清洗效果的定性和定量影响:污渍平均残留厚度随光斑吸收功率和扫描能量密度增大而减小,且减小的速率会逐渐变慢,在光斑吸收功率过大时,基材将出现损伤;污渍平均残留厚度随光斑直径和扫描速度的增大而变大,但减小光斑直径和扫描速度会降低清洗效率。提出了根据污渍层物性参数与扫描能量密度的对应关系来优化激光参数的方法,并对非平整表面污渍层进行了多次不间断扫描的仿真分析,得到了清洗效果随扫描次数的变化规律。

相较于其他针对热烧蚀激光清洗仿真模型的研究,文中的理论研究考虑了材料烧蚀潜热对激光能量的实时消耗,实现了潜热与显热之间的能量守恒,明确质量损失与能量消耗之间的数学关系,使模型的底层理论更加严谨自恰,提高了模型的精确度和可靠性。该研究结果对激光清洗设备的方案设计、优化改进和使用选型具有一定的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] Li Haoyu, Yang Feng, Guo Jiawei, et al. Development status and prospect of laser cleaning [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(5): 654-661. (in Chinese)
- [2] Song Feng, Liu Shujing, Niu Kongzhen, et al. Principle and application research on laser cleaning [J]. *Cleaning World*, 2005, 21(1): 1-6. (in Chinese)
- [3] Arif S, Armbruster O, Kautek W. Pulse laser particulate separation from polycarbonate: surface acoustic wave and thermomechanical mechanisms [J]. *Applied Physics A*, 2013, 111(2): 539-548.
- [4] Xue Yafei, Wang Wei, Wang Xuefeng, et al. Laser cleaning technology of 38CrMoAl material surface pollutants [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0706004. (in Chinese)
- [5] Hou Suxia, Luo Jijun, Xu Jun, et al. Laser cleaning technology application of military equipment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 357-360. (in Chinese)
- [6] Harris C D, Shen N, Rubenchik A M, et al. Characterization of laser-induced plasmas associated with energetic laser cleaning of metal particles on fused silica surfaces [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5212-5215.
- [7] Ge Xulei, Teng Hao, Zheng Yi, et al. Plasma cleaning of compressed grating in chirped-pulse femtosecond laser amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0402006. (in Chinese)
- [8] Ambar C, Amol S, Modi M H, et al. Study on effective cleaning of gold layer from fused silica mirrors using nanosecond-pulsed Nd: YAG laser [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(31): 7540-7548.
- [9] 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, 34(11): 1577-1581. (in Chinese)
- [10] Ye Yayun, Yuan Xiaodong, Xiang Xia, et al. Clearance of SiO<sub>2</sub> particles on K9 glass surfaces by means of laser shockwave [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(2): 245-248. (in Chinese)
- [11] Bilmes G M, Josué Vallejo, César Costa Vera, et al. High efficiencies for laser cleaning of glassware irradiated from the back: application to glassware historical objects [J]. *Applied Physics A*, 2018, 124: 347.
- [12] Zou Wanfang, Yin Zhen. The theoretical cleaning model of paint removal by short pulse laser [J]. *Journal of Gannan Normal University*, 2008, 6: 27-30. (in Chinese)
- [13] Chen Jufang Zhang Yongkang Xu Renjun, et al. Experimental research of paint removal with a fast axis flow CO<sub>2</sub> laser [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 64-70. (in Chinese)
- [14] Zhou Guilian, Kong Lingbing, Sun Haiying. Finite element analysis of temperature field based on ANSYS in laser cleaning mold [J]. *Manufacturing Automation*, 2008, 30(9): 90-92. (in Chinese)
- [15] Shi Shudong. Researches on theoretical model, numerical simulation and application of painting removal by laser cleaning[D]. Tianjin: Nankai University, 2012. (in Chinese)
- [16] Yue Liyang, Wang Zengbo, Li Lin, et al. Modeling and simulation of laser cleaning of tapered micro-slots with different temporal pulses [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 533-539.
- [17] Zhang Zhiyan, Zhang Jingyuan, Wang Yibo, et al. Removal of paint layer by layer using a 20 kHz 140 ns quasi-continuous wave laser [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2018, 174: 46-55.
- [18] Gao Liaoyuan, Zhou Jianzhong, Sun Qi, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser-cleaned aluminum alloy paint layer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502002. (in Chinese)