TA15钛合金氧化膜激光清洗温度场有限元模拟

李志超^{1,2}, 徐杰^{1,2*}, 张东赫^{1,2}, 单德彬^{1,2}, 郭斌^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学微系统与微结构制造教育部重点实验室, 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001

* E-mail: xjhit@hit.edu.cn

收稿日期: 2021-02-08; 接受日期: 2021-03-15; 网络版发表日期: 2021-10-26

国家重点研发计划(编号: 2017YFB1105000)、广东省重点领域研发计划(编号: 2018B090905003)和国家自然科学基金(批准号: U19A2077)资助项目

摘要 激光清洗是一种利用短脉冲高功率密度激光辐照清洗对象, 通过激光和清洗对象发生复杂的物理化学作用, 实现污染物被去除的非接触式清洗方式. 激光清洗机制十分复杂, 主要包括光致分解、光致剥离和光致振动, 均与激光清洗过程的温度场分布规律密切相关. 本文采用Comsol Multiphysics商业模拟软件, 建立了TA15钛合金氧化膜激光清洗有限元仿真模型, 分析了光斑形状、激光能量与加载方式、脉冲宽度等对钛合金氧化膜激光清洗过程温度场变化的影响规律. 结果表明, 在毫秒脉冲激光作用下基材损伤严重, 脉冲宽度越短表面热扩散越小, 方形平顶光斑较高斯光斑加热更均匀, 矩形脉冲较高斯光斑维持高温时间短, 基材不易损伤. 当方形平顶微秒脉冲激光以矩形加载方式时, 钛合金氧化膜激光清洗效果最佳.

关键词 激光清洗, 温度场, 氧化膜, 钛合金, 有限元模拟

1 引言

随着人类对激光与材料相互作用的认知加深, 激光器研制与装备技术不断发展, 激光在多领域中得到应用, 如激光切割^[1]、激光焊接^[2]、激光打标^[3]、激光清洗^[4]、激光抛光^[5]. 近年来制造业的不断发展, 材料成形前要对待修复及制造的关键部件进行清洗, 清洗掉表面的污染物, 避免对制造出成形部件的应用产生不利的影响. 传统的清洗方法包括喷砂喷丸清洗^[6]、化学清洗^[7]、超声波清洗^[8]、高压水射流清洗^[9]. 这些传统方法常伴随着污染环境、损伤基材、浪费资源和

效率低下等缺点. 激光清洗技术被誉为“21世纪最具潜力绿色清洗技术”, 通过激光和清洗对象发生复杂的相互作用, 实现污染物被去除且非接触式清洗方式. 激光清洗具有环保、不损坏基材、成本低、操作自动化和效率高等优点.

激光照射材料表面时会引起材料表面的温度变化, 而温度变化对污染物的清洗起着重要作用, 表面温度过高也会对基材造成损伤. 然而由于加载激光的参数较多, 进行工艺试验工作量较大, 通过有限元模拟激光清洗表面的温度分布规律, 进而分析激光清洗效果, 起到指导激光清洗技术应用的作用. Marimuthu等

引用格式: 李志超, 徐杰, 张东赫, 等. TA15钛合金氧化膜激光清洗温度场有限元模拟. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 318–332

Li Z C, Xu J, Zhang D H, et al. Finite element simulation of temperature field in laser cleaning of TA15 titanium alloy oxide film (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 318–332, doi: 10.1360/SST-2021-0059

人^[10]数值模拟了准分子激光清洗膜与颗粒的温度场, 并通过实验进行验证激光清洗过程中的机制, 经分析模拟结果与清洗实验结果一致. Sinha^[11]建立二维热模型脉冲激光烧蚀理论模型, 通过实验验证模型的正确性, 同时烧蚀速率没有随激光强度的增加而突然增加, 表明物质的喷射主要是通过正常沸腾机制, 通过模拟获得合理激光清洗工艺参数, 可以降低材料表面的损伤. Zhou等人^[12]通过模拟可知只要选择适当的激光参数和加工参数, 激光能有效地去除污物. 对去污因子的计算表明, 在最佳的激光烧蚀工艺条件下, 可取得满意的去污效果. Han等人^[13]研究激光清洗的热积累作用, 并建立数学模型, 研究激光作用损伤特征和机制, 对理解高重复率脉冲激光对光学元件的损伤机理有重要作用. 高辽远等人^[14]建立了纳秒脉冲激光清洗2024铝合金表面丙烯酸聚氨酯漆层的有限元模拟, 实现了激光清洗过程温度场与位移场的同步可视化分析, 预测激光清洗的工艺参数, 获得良好的涂装工艺要求表面. 邹万芳和尹真^[15]建立了短脉冲激光清洗理论模型, 可以应用该理论模型指导对飞机的除漆工艺研究; 周桂莲等人^[16]应用高斯热源建立二维热传导模型, 分析模具表面的温度场分布, 经分析结果较为准确; 张平等^[17]建立了激光等离子体冲击波清洗中的颗粒弹出模型, 并验证了颗粒弹出机制, 为等离子清洗提供理论依据. 目前, 有限元模型只聚焦于单一脉冲宽度, 单脉冲激光辐照于材料表面, 而没有对激光光斑形状、激光脉冲宽度和脉冲加载形式对激光清洗表面温度场的影响等方向研究.

本文通过模拟激光清洗钛合金氧化膜, 改变脉冲宽度、激光加载方式、光斑的形状来模拟激光清洗后材料表面温度变化, 对激光清洗后的温度分布进行分析, 研究不同激光加载特性对激光清洗效果的影响, 进而对激光清洗结果进行预测, 对激光加工技术的应用起到指导作用.

2 有限元模型建立

本文应用COMSOL Multiphysics有限元模拟软件, 通过模拟激光能量流加载于待清洗材料表面, 移动激光光斑, 建立激光清洗表面瞬态温度场有限元模型. 对激光清洗过程进行以下假设:

(1) 激光以能量的形式加载于模型表面, 待清洗材

料为均质体, 材料各方向性质相同;

(2) 未进行激光清洗时, 待清洗组件初始温度为 297.3 K ($T|_{t=0}=T_0=297.15$ K);

(3) 在整个激光清洗过程中, 不考虑光分解等效应对激光清洗效果的影响.

为研究TA15钛合金表面氧化膜激光清洗效果, 建立激光清洗TA15钛合金表面氧化膜实验模型(图1). 几何模型为20 μm 厚的氧化膜, 覆在长10 mm、宽6 mm和厚0.5 mm的长方体上表面.

激光作用材料表面发生一系列能量转换过程, 首先激光加载到材料表面, 材料表面温度迅速升高, 表面与周围环境存在温度差, 将会向空间四周发生热辐射, 同时表面的能量向材料内部传导. 由于模型受激光加热产生表面空气温度差, 进而发生空气流动, 表面热量与空气发生自然对流, 所以, 建立激光清洗过程中能量转换模型:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_{\text{ext}}, \quad (1)$$

其中, Q_1 为材料表面热积累项, 即使材料表面温度升高的能量, Q_2 为材料内部经过热传导的能量, Q_3 为表面热对流能量, Q_4 为材料表面发生热辐射能量, Q_{ext} 为激光作用于材料表面的能量^[18,19].

$$Q_1 = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

$$Q_2 = -k \cdot \Delta T, \quad (3)$$

$$Q_3 = h(T_0 - T), \quad (4)$$

$$Q_4 = \varepsilon \sigma (T_0^4 - T^4), \quad (5)$$

其中, ρ , C_p , k , h , ε 和 σ 分别为被激光清洗材料的密度、比热容、热导率、热对流系数、热辐射系数和斯忒藩-玻尔兹曼常数.

激光加载的形式分为高斯脉冲加载形式、矩形脉冲加载形式和连续加载形式(图2). 高斯脉冲加载方式为^[20]

$$G(t) = I_0 \left(\frac{t}{t_1} \right)^\beta \cdot \exp \left[\beta \left(1 - \frac{t}{t_1} \right) \right], \quad (6)$$

其中, I_0 为最高能量密度($I_0=P/(t_0 \cdot f \cdot A)$), β 为加载脉冲形状因子, t_1 是激光在脉冲加载从最低能量增加到最高所需要的时间($t_1=t_0/2.45$), P 为激光输出的平均功率, f 为激光脉冲输出的重复频率, A 为激光输出光斑的面积.

矩形脉冲能量加载也可以表示为

图 1 (网络版彩图)模型实体图
Figure 1 (Color online) Model solid figure.

图 2 (网络版彩图)激光加载能量的形式
Figure 2 (Color online) The form of laser loading energy.

$$R(t) = \begin{cases} I_0, & \frac{n}{f} \leq t \leq t_0 + \frac{n}{f}, \\ 0, & t_0 + \frac{n}{f} < t < \frac{n+1}{f}, \end{cases} \quad (7)$$

$n = 0, 1, \dots$

由于光束整形系统对激光器进行了准直整形, 激光束照射材料表面将会形成圆形高斯光斑和方形平顶光斑, r 为圆形高斯光斑半径(图3). 光斑方程表示为

$$g(x, y) = \exp(-(x^2 + y^2) / r^2). \quad (8)$$

想要构建方形平顶光斑, L 为方形平顶光斑的边长, 建立方波函数式(9):

$$A(e) = \begin{cases} 1, & -\frac{L}{2} \leq e \leq \frac{L}{2}, \\ 0, & -\infty < e < -\frac{L}{2}, \frac{L}{2} < e < +\infty. \end{cases} \quad (9)$$

所以, 方形平顶光斑方程为

$$s(x, y) = A(x) \cdot A(y). \quad (10)$$

所以, 激光6种加载形式如下:

$$I_0(x, y, t) = \begin{cases} G(t) \cdot g(x, y), \\ G(t) \cdot s(x, y), \\ R(t) \cdot g(x, y), \\ R(t) \cdot s(x, y), \\ \frac{P}{A} \cdot g(x, y) \cdot t, \\ \frac{P}{A} \cdot s(x, y) \cdot t. \end{cases} \quad (11)$$

所以, 外部加载能量 Q_{ext} 的表达式如下:

$$Q_{\text{ext}} = (1 - R)I_0(x, y, t)A, \quad (12)$$

其中, R 为表面激光反射系数, A 等离子屏蔽系数. 氧化膜的热学参数如表1所示.

选取圆形高斯光斑直半径为1 mm, 方形平顶光斑边长为1 mm. 毫秒脉冲宽度为10 ms, 重复频率为10 Hz, 为使激光达到清洗效果, 光斑搭接率 $\eta \geq 0$, 根据式(13)光斑运行速度为10 mm/s; 同样, 设定微秒脉冲激光脉冲宽度50 μ s, 重复频率为1000 Hz, 扫描速度为1000 mm/s. 为方便对比选取连续激光的扫描速度分别

图 3 (网络版彩图)光斑的能量分布. (a) 高斯光斑; (b) 方形平顶光斑

Figure 3 (Color online) Energy distribution of spot. (a) Gaussian spot; (b) square spot.

表 1 氧化膜的热学参数

Table 1 Thermal parameters of oxide film

参数	数值
密度 ρ (kg/m^3)	4320
比热容 C_p ($\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0.71
热导率 k ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0.62
初始温度 (K)	293.15
熔融温度 (K)	2123
沸腾温度 (K)	3673
热对流系数 h ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	10
表面辐射系数 ε	0.58
玻尔兹曼常数 σ ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$)	5.67×10^{-8}
脉冲形状常数 β	1
高斯光斑半径 r (mm)	0.5
方形平顶光斑边长 L (mm)	1
反射率 R	0.55
等离子体屏蔽系数 A	0.9

为10和1000 mm/s^[21].

$$\eta = \left(1 - \frac{v}{Df}\right) \times 100\% \geq 0, \quad (13)$$

其中, v 为激光光斑的运动速度, D 为光斑直径, f 为激光的重复频率.

综上所述, 本文通过建立激光清洗钛合金氧化膜有限元模型, 分别通过数学公式建立不同光斑形状、能量加载形式和脉冲宽度的激光特性作用于钛合金表面氧化膜, 模拟激光清洗过程中的温度场变化. 其中, 激光光斑形状分别为高斯光斑和方形平顶光斑; 激光能量加载方式分别为高斯脉冲和矩形脉冲; 激光光斑

脉冲宽度分别为连续激光、毫秒脉宽激光和微秒脉宽激光.

3 激光辐照温度场模拟结果

3.1 表面温度与烧蚀深度

图4(a), (c), (e)为不同参数激光清洗钛合金表面氧化膜所能达到的最高温度. 随着激光输出功率的增加, 表面吸收激光能量增加, 氧化膜所能达到的最高温度也将会升高. 在同样的激光输出平均功率下, 方形平顶光斑能量分布均匀且处于最高能量, 而圆形高斯光斑会由光斑中心沿径向光斑边界能量下降, 所以方形平顶光斑加载氧化膜表面达到的最高温度比圆形高斯光斑要高; 当激光光斑移动速度较低时, 表面在光斑单位面积下加载的时间较长, 表面单位面积吸收能量较大, 达到的最高温度也将会越高. 在同种光斑作用下, 相较于高斯脉冲加载, 矩形脉冲在激光能量较高时间较长, 表面氧化膜所能达到的最高温度更高. 对于连续激光, 表面温度达到的最高温度范围为2979.2~7880 K; 毫秒脉冲激光加载所能达到的最高温度范围为5223~15422.2 K; 微秒激光表面最高温度范围为2362.9~11881.8 K, 表面温度较毫秒激光低, 与连续激光相比略高. 为研究激光烧蚀深度的最大深度, 假设当材料表面温度超过其沸点时, 材料由光致烧蚀与剥离作用被去除^[22], 从图4(b), (d)和(f)中可以看出, 随着激光光斑运动速度的增加, 氧化膜去除深度减弱. 毫秒脉冲激光单脉冲作用于材料表面氧化膜均被清洗掉, 基材被激光能量烧蚀, 发生基材损伤. 相较毫秒脉冲激光, 微秒脉冲激光去除氧化膜效果较弱, 最高的约

图 4 (网络版彩图)激光清洗后最高温度与去除深度. (a), (b) 连续激光最高温度, 去除深度; (c), (d) 毫秒激光最高温度, 去除深度; (e), (f) 微秒激光最高温度, 去除深度

Figure 4 (Color online) Maximum temperature after laser cleaning and removal depth. (a), (b) Continuous laser maximum temperature and removal depth; (c), (d) millisecond laser maximum temperature and removal depth; (e), (f) microsecond laser maximum temperature and removal depth.

为8 μm, 不损伤基材表面. 对于高频短脉冲激光, 单脉冲激光的峰值功率高, 作用材料表面很容易上升到较高温度, 但激光的脉宽较短, 表面热传导的深度较低, 所以清洗氧化膜的深度较小, 为满足实际清洗效果, 激光光斑搭接率必须大于等于零($\eta \geq 0$), 在单位面积上可

经过至少一个光斑进行光斑加载清洗. 但在实际应用中激光光斑必须在较快的速度下进行清洗, 且在多短脉冲的作用下激光的去除深度较容易控制, 而不伤害基材, 则较高的激光重复频率和较短激光脉冲宽度是最优的选择, 可以控制激光的清洗深度与清洗效率.

3.2 表面温度演化规律

为研究激光清洗过程中表面温度随时间变化, 应用 300 W 功率激光作用表面氧化膜, 获得表面最高温度变化曲线. 图 5(a)和(b)为不同移动速度的连续激光加载过程中表面最高温度随时间变化. 方形平顶光斑

加载在边界时能量只能向一侧方向传导, 所以能量积累较快, 在同样的时间下能量积累较大, 温度快速升高, 当光斑继续移动到模型内部, 由于温度的热传导变更为向四周传导, 表面温度略有下降, 表面温度维持稳定. 同理, 当光斑运动到另一模型边缘, 温度仍然会有升高, 所以温度曲线将会在运动时间开始和结束

图 5 (网络版彩图)激光清洗表面温度随着时间变化规律. (a) 10 mm/s 连续激光; (b) 1000 mm/s 连续激光; (c) 毫秒脉冲激光; (d) 0.6~0.7 s 毫秒脉冲激光; (e) 微秒脉冲激光; (f) 0.006~0.007 s 微秒脉冲激光

Figure 5 (Color online) Variation of surface temperature with time. (a) 10 mm/s continuous laser; (b) 1000 mm/s continuous laser; (c) millisecond pulse laser; (d) 0.6~0.7 s millisecond pulse laser; (e) microsecond pulsed laser; (f) 0.006~0.007 s microsecond pulsed laser.

温度较高;而对于圆形高斯光斑,由中心到边界存在能量降低,所以温度曲线较平均呈现直线型,但方形平顶光斑较圆形高斯光斑温度高,激光运动速度越快,表面在单位面积受到能量加载时间越短,表面能够达到最高温度也将越低。图5(c)和(d)为毫秒激光清洗材料表面最高温度随时间变化,模型表面温度先随着波形加载能量增加而增加,后随着能量降低或消失而快速下降。对于相同光斑形状,矩形脉冲加载相较于高斯脉冲加载于模型表面温度更高。矩形脉冲加载过程中,激光脉冲能量加载结束,能量迅速消失为零,致使表面温度“断崖”式下降,所以矩形脉冲表面温度曲线相较于高斯脉冲在温度曲线更加尖锐,而高斯脉冲加载过程中光斑能量下将缓慢,所以温度下降较缓慢。在矩形脉冲激光始终保持在最高的能量密度,所以表面的温度始终呈现上升,在该激光作用周期经过10 ms后,表面温度达到最高。但高斯脉冲加载氧化膜表面,激光能量先递增后递减,在温度达到最高后,脉冲的后续能量不足以弥补表面热量的损耗,温度降低,但表面仍然受激光能量照射,所以表面温度也将会缓慢下降,所以矩形脉冲激光加载在表面温度达到最高时刻略滞后高斯脉冲激光加载,且矩形脉冲能够达到温度大于高斯脉冲。图5(e)和(f)为微秒激光加载材料表面单位时间内温度曲线。由于加载时间更短,温度快速降低,致使温度在脉冲结束后下降到较低温度。随着光斑的继续前进,表面温度呈现周期性变化。矩形脉冲较高斯脉冲温度分布更加尖锐,光斑形状对表面的温度影响程度强于脉冲加载形式的影响,微秒脉冲宽度加载时间更短,不同脉冲形状加载方式虽引起温度差异,但光斑形状对表面温度影响也会相对增强,且方形平顶光斑比圆形高斯光斑能达到的温度更高。

3.3 不同时刻表面温度分布规律

图6(a)和(b)为不同时刻的连续激光(300 W)温度分布。圆形高斯光斑在不同时刻的温度分布呈现类高斯温度分布,随着圆形高斯光斑的向前运动,表面温度分布形状同样会向前移动;而对于方形平顶光斑,由于激光光斑运动速度较慢(10 mm/s)时,光斑移动速度较慢,温度有足够的时间升高,表面温度也会呈现类似方形平顶光斑分布,在边缘呈现略微升高。对于激光扫描速度为1000 mm/s时,圆形高斯光斑加热热影响区分布形状更加尖锐;方形平顶光斑移动速度较快时,方

形平顶光斑特性为能量均匀且最大,表面某一位置将会受方形平顶光斑持续加热,最终在光斑的后边界温度达到最高,且温度分布较尖锐。图6(c)和(d)为模拟毫秒脉冲激光(300 W)清洗材料表面温度变化。根据激光加载波形的不同,表面温度随能量加载强度的不同,表面温度达到最高温度时间不同,矩形激光脉冲与高斯脉冲激光分别为各激光周期开始后经过0.01 s与0.006 s时达到最高温度,激光加载后的表面温度分布与光斑的形状一致。由于激光光斑的移动速度较小,方形平顶光斑在后边界存在少累计,所以方形平顶光斑加载后容易在光斑后边界出现少量的上翘;当单个周期结束后,方形平顶光斑表面的残余的温度要高于圆形高斯光斑的温度。图6(e)和(f)为微秒级脉冲激光(300 W)清洗材料表面在不同时刻的温度变化。材料表面的温度与光斑形状一致,在激光向前运动过程中,由于激光运动速度较大,所以在前一时刻温度分布保持光斑形状,但是分布较窄。随着激光的继续前进,前一光斑温度将会略有降低,所以光斑温度出现波浪形的温度分布。而对于方形平顶光斑,由于光斑呈现均匀分布,且光斑搭接率为0,方形平顶光斑边界互相接触,即在光斑路径上呈现直线温度分布,只有在加热起初时刻,温度将会有较长时间消耗,所以温度在起始光斑位置有所下降。

3.4 激光加载截面温度场分布规律

图7为连续激光(300 W)清洗截面温度分布,选取激光光斑中心作用于材料表面5 mm位置进行研究。根据模拟结果可知,方形平顶光斑与圆形高斯光斑作用材料横截面方向以光斑形状分布。激光光斑移动速度(10 mm/s)越小,材料表面温度越高,热影响区越大,纵截面热影响区会出现略微滞后;对于激光光斑以高速(1000 mm/s)在模型向前移动时,纵截面的温度分布呈现彗星尾状结构。热影响区在材料的运动方向上存在滞后,运动速度越大热影响区域滞后效应越严重。当等温线在基材与氧化膜产生不连续现象(主要因为基材与氧化膜的热学系数不同),将会产生较大的热应力,这一现象会对氧化膜的去除产生重要作用。

图8为毫秒脉冲激光(300 W)截面的温度分布。方形脉冲选取时间为0.51和0.6 s,高斯脉冲选取时间为0.506和0.6 s,方形脉冲与高斯脉冲分别在0.51和0.506 s时,氧化膜温度达到最大,且在深度方向仍然保持较高

图 6 (网络版彩图)激光清洗不同时刻温度分布. (a) 连续高斯光斑; (b) 连续方形光斑; (c) 毫秒矩形脉冲; (d) 毫秒高斯脉冲; (e) 微秒矩形脉冲; (f) 微秒高斯脉冲

Figure 6 (Color online) Temperature distribution at different time. (a) Continuous Gaussian spot; (b) continuous square spot; (c) millisecond rectangular pulse; (d) millisecond Gaussian pulse; (e) microsecond rectangular pulse; (f) microsecond Gaussian pulse.

的温度水平, 基材将会发生较深的损伤. 在横截面温度分布呈对称结构, 在深度方向分布同样与方形平顶光斑一致, 热影响区随深度方向边界向内收缩. 在单脉冲结束后温度分布将会变得均匀, 且热影响区较深. 因为毫秒脉冲激光加载能量和脉冲宽度均较大, 所以相较于高速扫描连续激光的热影响区域较大, 基材受

损严重. 又因为激光光斑速度较小, 所以彗星热影响区较小且不明显.

图9为微秒脉冲激光(300 W)清洗材料截面温度分布, 可以看出随着单脉冲激光加载过程, 由于材料脉冲宽度为微秒级, 能量加载时间较短所以温度的深度分布较小. 同样由于脉冲时间较短, 所以在光斑的横方

图 7 (网络版彩图)连续激光的截面温度分布. (a)~(d) 10 mm/s 光斑速度; (e)~(h) 1000 mm/s 光斑速度
Figure 7 (Color online) The section temperature distribution after continuous laser loading. (a)~(d) 10 mm/s spot velocity; (e)~(h) 1000 mm/s spot velocity.

向和纵方向温度与光斑形状分布一致. 光斑继续向前移动, 光斑加载的前一位置热量来不及传导消散完全, 表面温度在方形脉冲加载后呈现阶梯式的温度向内传导, 而对于圆形高斯光斑温度分布呈现火焰形.

3.5 激光加载表面温度场分布规律

图10为连续激光(300 W)加载材料表面温度分布图, 为不同光斑的扫描速度下表面在0.5 s与0.005 s处

图 8 (网络版彩图) 毫秒激光的截面温度分布. (a)~(d) 0.51 s 矩形脉冲激光加载; (e)~(h) 0.506 s 高斯脉冲加载

Figure 8 (Color online) The section temperature distribution after millisecond laser loading. (a)~(d) 0.51 s rectangular pulse laser loading; (e)~(h) 0.506 s Gaussian pulse loading.

表面温度分布, 进行激光清洗表面温度分布. 在扫描速度(10 mm/s)较少时, 圆形高斯光斑与方形平顶光斑与光斑能量分布一致, 在激光光斑运动路径下会存在较低温度的等温线. 在激光运动速度(1000 mm/s)较高时, 圆形高斯光斑与方形平顶光斑表面温度分布因激光光

斑运动, 呈现较高温度彗星分布. 方形平顶光斑呈现方形能量均匀分布, 在光斑运动过程中持续加热, 最后在光斑后边界达到最高. 在光斑运动后, 会出现加热痕迹, 呈现明显拉长的痕迹.

图11为毫秒脉冲激光加载(300 W)后表面温度在

图 9 (网络版彩图)微秒激光加载后截面温度分布. (a)~(d) 0.00505 s, 矩形脉冲; (e)~(h) 0.005045 s, 高斯脉冲加载; (i), (j) 0.006 s温度分布

Figure 9 (Color online) The section temperature distribution after microsecond laser loading. (a)~(d) 0.00505 s rectangular pulse; (e)~(h) 0.005045 s Gaussian pulse loading; (i), (j) 0.006 s temperature distribution.

图 10 (网络版彩图)连续激光表面温度分布. (a), (b) 10 mm/s 光斑移动速度; (c), (d) 1000 mm/s 光斑移动速度

Figure 10 (Color online) Temperature distribution of continuous laser surface temperature. (a), (b) 10 mm/s spot velocity; (c), (d) 1000 mm/s spot velocity.

图 11 (网络版彩图)毫秒激光表面温度分布. (a), (b) 0.51 s 矩形脉冲加载; (c), (d) 0.506 s 高斯脉冲加载; (e), (f) 0.6 s 温度分布

Figure 11 (Color online) Temperature distribution of millisecond laser surface temperature. (a), (b) 0.51 s rectangular pulse loading; (c), (d) 0.506 s Gaussian pulse loading; (e), (f) 0.6 s temperature distribution.

最高温度时刻(0.51, 0.506 s)与脉冲加载结束(0.6 s)时的温度分布。由于激光为脉冲加载, 在加载过程中分为脉冲能量加载与脉冲能量空载, 在激光加载时表面温度升高到最大, 而在脉冲空载结束后表面温度达到最低。在激光光斑能量加载最大时, 温度分布与光斑一致, 且与光斑能量分布一致。在激光光斑移动过程中, 可以明显地看到前一个光斑冷却的残存的温度场。单个脉冲加载结束后, 脉冲空载时间较长, 由于能量在加载平面的传导, 温度进行重新分配, 最终表面温度呈现彗星温度分布, 温度最终扩散于整个表面, 方形平顶光斑也同样呈现彗星分布, 表面温度由中心向四周传

播分布。

图12为微秒激光(300 W)加热表面, 表面温度分布与光斑的分布一致。根据光斑脉冲加载过程及波形的变化, 表面存在最高与最低温度周期性变化, 最高温度时刻表面温度呈现与光斑温度分布一致。激光加载过程中, 表面温度迅速达到最高, 后缓慢降低, 最终在材料表面存在前一光斑温度遗留的温度分布, 但温度较低。对于方形平顶光斑加载形式, 由于边界呈现方形, 光斑搭接率为零, 光斑边界加热区域相连续, 但由于光斑重复周期性变化, 表面阶梯式温度降, 对于高斯光斑加载表面也会存在前一光斑加热痕迹。

图12 (网络版彩图)微秒激光表面温度分布. (a), (b) 0.00505 s, 矩形脉冲加载; (c), (d) 0.005045 s, 高斯脉冲加载; (e), (f) 0.6 s 温度分布

Figure 12 (Color online) Temperature distribution of the surface temperature of the microsecond laser. (a) (b) 0.00505 s rectangular pulse loading; (c), (d) 0.005045 s Gaussian pulse loading; (e), (f) 0.6 s temperature distribution.

4 结论

(1) 表面最高温度随着扫描速度增加而降低. 在激光加载的过程中, 方形平顶光斑比圆形高斯光斑能够达到的表面温度更高, 表面清洗更加均匀, 清洗效果更佳.

(2) 毫秒脉冲激光比连续激光与微秒脉冲激光清洗表面能够达到温度更高, 毫秒脉冲激光去除深度远远高于连续激光与微秒脉冲激光去除深度, 基材损伤严重.

(3) 短脉冲激光清洗表面污物, 表面温度将会在极短的时间内快速升高后迅速下降, 温度在深度扩散较少, 损伤较小, 清洗的效果及深度更容易控制.

(4) 矩形脉冲激光比高斯脉冲激光作用氧化膜表面温度上升更快, 温度下降也快, 对表面氧化膜去除效果更佳.

(5) 激光清洗技术应用中, 首选矩形脉冲和方形平顶光斑, 较高的重复频率与较小脉冲宽度. 通过控制表面的光斑搭接率, 使表面单位面积经过多光斑照射, 达到容易控制清洗效果的目的.

参考文献

- Li Y, Latham W P, Kar A. Lumped parameter model for multimode laser cutting. *Opt Lasers Eng*, 2001, 35: 371–386
- Zhan X, Yu H, Feng X, et al. A comparative study on laser beam and electron beam welding of 5A06 aluminum alloy. *Mater Res Express*, 2019, 6: 056563
- Sobotova L, Badida M. Laser marking as environment technology. *Open Eng*, 2017, 7: 303–316
- Chen Y D, Tsai W J, Liu S H, et al. Picosecond laser pulse polishing of ASP23 steel. *Opt Laser Tech*, 2018, 107: 180–185
- Serebryakov V A, Gratsianov K V, Eremenko A S, et al. Laser strengthening of metals. *J Opt Technol*, 2005, 72: 237
- Bartha L, Koltay E, Mörík G. Abrasive blast cleaning method for the renewal of worn-out acceleration tubes. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 1996, 111: 157–160
- Park K B, Choi C, Yu H W, et al. Optimization of chemical cleaning for reverse osmosis membranes with organic fouling using statistical design tools. *Environ Eng Res*, 2018, 23: 474–484
- Verhaagen B, Zanderink T, Fernandez Rivas D. Ultrasonic cleaning of 3D printed objects and cleaning challenge devices. *Appl Acoust*, 2016, 103: 172–181
- Zhang Y, Cao Y P, Lu H, et al. Experiment and simulation of high pressure water jet cleaning on ship surface (in Chinese). *Ship Ocean Eng*, 2020, 49: 86–89 [张悦, 曹宇鹏, 陆华, 等. 船舶表面高压水射流清洗实验与仿真. *船海工程*, 2020, 49: 86–89]
- Marimuthu S, Mhich A, Molchan I S, et al. Numerical simulation of excimer laser cleaning of film and particle contaminants. *J Heat Transfer*, 2013, 135
- Sinha S. Thermal model for nanosecond laser ablation of alumina. *Ceramics Int*, 2015, 41: 6596–6603
- Zhou X, Imasaki K, Furukawa H, et al. Simulation study and experiment on laser-ablation surface cleaning. *Opt Laser Tech*, 2001, 33: 189–194
- Han J, Li Y, Zhang Q, et al. Phase explosion induced by high-repetition rate pulsed laser. *Appl Surf Sci*, 2010, 256: 6649–6654
- Gao L Y, Zhou J Z, Sun Q, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser cleaning aluminum alloy coating (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2019, 46: 335–343 [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. *中国激光*, 2019, 46: 335–343]
- Zou W F, Yin Z. Establishment of theoretical cleaning model for short pulse laser depainting (in Chinese). *J Gannan Normal Univ*, 2008, 29: 27–30 [邹万芳, 尹真. 短脉宽激光除漆理论清洗模型的建立. *赣南师范学院学报*, 2008, 29: 27–30]
- Zhou G L, Kong L B, Sun H Y. Finite element analysis of surface temperature field of laser cleaning mould based on ANSYS (in Chinese). *Manuf Autom*, 2008, 30: 90–92 [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. *制造业自动化*, 2008, 30: 90–92]
- Zhang P, Bian B M, Li Z H. Particle ejection removal in laser plasma shock wave cleaning (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2007, 10: 1451–1455 [张平, 卞保民, 李振华. 激光等离子体冲击波清洗中的颗粒弹移出移除. *中国激光*, 2007, 10: 1451–1455]
- Zhou X, Imasaki K, Furukawa H, et al. Simulation study and experiment on laser-ablation surface cleaning. *Opt Laser Tech*, 2001, 33: 189–194
- Petela R. Exergy of undiluted thermal radiation. *Sol Energy*, 2003, 74: 469–488
- Stafe M, Negutu C, Popescu I M. Theoretical determination of the ablation rate of metals in multiple-nanosecond laser pulses irradiation regime.

[Appl Surf Sci](#), 2007, 253: 6353–6358

- 21 Zhou C, Li H, Chen G, et al. Effect of single pulsed picosecond and 100 nanosecond laser cleaning on surface morphology and welding quality of aluminium alloy. [Opt Laser Tech](#), 2020, 127: 106197
- 22 Yue L, Wang Z, Li L. Modeling and simulation of laser cleaning of tapered micro-slots with different temporal pulses. [Opt Laser Tech](#), 2013, 45: 533–539

Finite element simulation of temperature field in laser cleaning of TA15 titanium alloy oxide film

LI ZhiChao^{1,2}, XU Jie^{1,2}, ZHANG DongHe^{1,2}, SHAN DeBin^{1,2} & GUO Bin^{1,2}

¹ Key Laboratory of Micro-Systems and Micro-Structures Manufacturing of Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

² School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China

Laser cleaning is a noncontact cleaning method that uses a short-pulse high power density laser to irradiate an object. The pollutants are removed by the complex physical and chemical interactions between the laser and the object to be cleaned. The mechanism of laser cleaning is very complex, including photodegradation, photodetachment, and photovibration, which are closely related to the temperature distribution in the laser-cleaning process. In this study, the finite element simulation model of laser cleaning of TA15 titanium alloy oxide film is established by using Comsol Multiphysics commercial simulation software. The influence of spot shape, laser energy, loading mode, and pulse width on the titanium alloy oxide film temperature field is analyzed. The results showed that the substrate was severely damaged by a millisecond pulse laser. The shorter the pulse width, the smaller the surface thermal diffusion. The square flat-top spot was more evenly heated than the Gaussian spot, and the rectangular pulse was less damaged than the Gaussian spot. The laser-cleaning effect of titanium alloy oxide film was the best when the square flat-top laser was loaded in a rectangular pulse.

laser cleaning, temperature field, oxide film, titanium alloy, finite element simulation

doi: [10.1360/SST-2021-0059](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0059)