

文章编号: 1001-3806(2016)02-0274-06

有限元法移动激光除漆的温度场分析与实验研究

刘彩飞, 冯国英*, 邓国亮, 吴常顺, 陈康喜, 王德良

(四川大学 电子信息学院 激光微纳工程研究所, 成都 610064)

摘要: 为了研究脉冲激光去除金属表面漆膜的过程, 采用有限元法建立模型, 模拟了喷有漆膜的不锈钢样品表面在移动脉冲激光作用下的温度场, 研究了不同时刻漆膜表面的温度场分布以及激光参量对漆膜表面温度场的影响, 并做了相关对比实验。结果表明, 漆膜表面温度随激光源的移动而变化, 温度场呈现带尾的彗星状; 漆膜表面的温度随激光能流密度和激光重复率的增加而线性增加, 随着扫描速率的增加而指数递减; 激光能流密度和激光重复率越大而激光扫描速率越小时, 激光除漆效率越高; 温度的累积效应可以提高除漆的效率。该结果可以为实际激光除漆过程中激光参量的选取提供参考。

关键词: 激光技术; 激光除漆; ANSYS 软件; 能流密度; 扫描速率; 激光重复率

中图分类号: TG156.99 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.026

Temperature field analysis and experiment study about paint irradiated by moving laser based on FEM

LIU Caifei, FENG Guoying, DENG Guoliang, WU Changshun, CHEN Kangxi, WANG Deliang

(Institute of Laser & Micro/Nano Engineering, School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In order to analyze the process of laser removal of paint on metal surface, the model was established by using finite element method (FEM). Temperature distribution on stainless steel surface with paint film irradiated by moving laser was simulated. The relative and comparative experiment was done. The results show that, temperature of paint film changes with the movement of laser source. Temperature distribution has a rendering tail like comet-shape. The peak temperature of paint film increases linearly with the increase of laser fluence and laser repetition rate, and decreases exponentially with the increase of scanning rate. The higher the laser fluence and repetition rate, the higher the paint removal efficiency. Cumulative effect of temperature can improve the efficiency of removing paint. The results can give references to select laser parameters in the process of laser paint removal.

Key words: laser technique; laser removal of paint; ANSYS software; laser energy density; scanning rate; laser repetition rate

引言

激光清洗相比于传统清洗方法而言, 具有操作简单、效率高、污染环境较轻等优点, 已成为发展趋势。该技术已经成功应用于半导体器件清洗、艺术品保护、城市涂鸦清洗, 以及激光除漆等工业领域^[1-4]。BARLETTA 等人利用二极管阵列激光扫描附有漆膜的铝板样品, 从实验和理论两方面研究了激光参量对除漆效率的影响, 最后通过数值统计的方法验证了实验的合理性^[5]。SCHWEIZER 等人采用 CO₂ 激光器对漆膜

进行了去除, 认为 CO₂ 激光去除油漆的关键参量是激光功率密度, 并利用喇曼光谱和表面形貌判定了除漆的效率, 同时发现激光束扫描线重叠率对除漆的效率有一定的影响^[6-7]。BRYGO 等人利用调 Q 二极管抽运 Nd:YAG, 研究高重复频率下激光参量对除漆效率的影响, 发现除漆的效率和重复率的热沉积有关, 除漆阈值和脉冲持续时间有关^[8]。同年, BRYGO 等人建立了激光加热模型, 采用红外高温计测定了实验过程中的温度, 验证了理论模型的合理^[9]。TEULE 等人综合应用比色法、光谱技术、质谱分析和测定、温度图和紫外线投射测量对紫外激光清洗艺术品上油漆进行控制^[10]。CIOFINI 等人首次将调 Q Nd:YAG 激光器作为去除油画中油漆的过度污染, 研究发现激光损伤阈值随着脉冲个数而降低^[11]。ZHOU 等人利用 ANSYS 模拟了激光清洗模具表面的温度变化, 计算了模具表

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60890203)

作者简介: 刘彩飞(1988-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光与物质相互作用的研究。

* 通讯联系人。E-mail: guoying-feng@scu.edu.cn

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-07

面节点的温度分布与激光参量对温度场的影响^[12]。MENG 等人采用大气等离子喷涂技术在铝基体表面制备了氧化锆涂层,并且用脉冲激光进行重熔处理,结果发现激光能量对涂层的成型及性能有重要的影响^[13]。除漆过程中漆的热分解和熔化烧蚀起了关键作用,脉冲激光能流密度、激光重复频率以及扫描速率对除漆效果影响极大。YANG 等人研究了激光除漆过程中热应力的影响,结果发现:油漆吸收激光能量,在边缘形成较大的温度梯度,最终在热应力的作用下去除漆膜^[14]。另外也有人^[15]认为纳秒激光作用油漆时间较短,可通过油漆瞬间融化、气化来达到除漆的目的。由此可见,研究激光参量对于油漆表面温度场的影响至关重要。

本文中利用有限元分析软件 ANSYS 建立了在脉冲激光作用下漆膜表面温度分析的有限元模型,模拟了移动脉冲激光源作用油漆和基板表面的温度场。研究了激光能流密度、扫描速率和激光重复频率对漆膜的温度场分布的影响,分析了激光参量与漆膜表面最高温度的关系,并做了相关激光除漆的对比实验,验证了模拟分析的正确性。本文中的研究结果可以为实际激光除漆过程中激光参量的选择提供参考。

1 理论模型

图 1 所示为具有高斯分布的基模(TEM₀₀)脉冲激光源垂直加载到漆膜的表面。漆膜涂在几何尺寸为 L × W × H 的不锈钢板上,漆膜的厚度为 d,漆膜的上表面为 x-O-y 平面,光轴与 z 轴重合。激光源以一定的速率 v 沿着漆膜表面(z=0)x 的正方向移动。由图 1 可知,该模型是沿着 y=0 平面对称的。

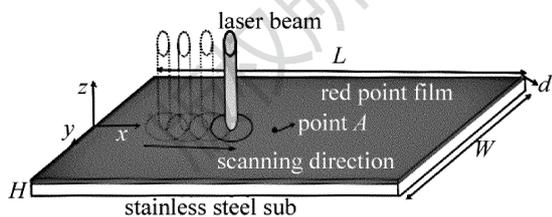


Fig. 1 Scheme of theoretical analysis model

根据傅里叶定律和能量守恒原理可得具有轴对称的 3 维温度场控制方程为^[16]:

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

式中, T 为温度, ρ 为材料的密度, c 为比热容, κ 为导热系数。

为了分析求解上述方程,需要知道方程所满足的初始条件和边界条件,本文中采用以下假定^[14,17]:(1)材料各向同性,各热物理参量不随温度的变化而变化;

(2)分析时忽略材料的相变对于温度的影响;(3)忽略激光从漆膜表面传至不锈钢基板的弛豫时间;(4)由于模型是沿着 y=0 平面对称,所以模拟时取模型一半来分析。

由于纳秒激光与样品作用时间极短,且漆膜厚度较小,以上假定与实际情况基本符合^[14]。由以上假定所得的边界条件和初始条件如下^[17]:

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial z} + h(T_s - T_0) + B\varepsilon(T_s^2 - T_0^4) = \alpha I(x, y, z, t), (z = 0) \quad (2)$$

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_n - T_0), (z = -H; x = 0, L; y = \pm W/2) \quad (3)$$

$$T(t) = T_0, (t = 0) \quad (4)$$

式中, T₀ 为材料的初始温度, T_s 为激光作用区域的温度, T_n 为激光未作用区域的温度, h 为对流换热系数, B 为斯忒藩-玻尔兹曼常数, α 为材料对激光的线性吸收系数, I(x, y, z, t) 为激光源的功率密度。

在激光热源模型中,点热源和线热源都用于温度场解析解,但研究表明计算结果与实际结果有较大的误差。由于纳秒激光作用时间很短,热源一般都停留在表面,所以,采用高斯面热源分布是一种比点热源和线热源更切实际的热源分布函数^[18]。本文中采用高斯分布的面热源形式,热流分布函数如下式所示^[17,19]:

$$I(x, y, z, t) = \alpha Q_{\max} (\pi w^2 \tau)^{-1} \times \exp \left[-2 \frac{(x - vt)^2 + y^2}{w^2} \right] \exp \left[-2 \frac{(t - \tau)^2}{\tau^2} \right] \delta(z) \quad (5)$$

式中, w 表示光斑半径, τ 为脉宽, Q_{max} 为激光输出能量, δ(z) 为冲击函数。

在激光除漆过程中,激光能量以热流密度的形式加载到漆膜的表面,激光光源以扫描速率 v 移动,利用 ANSYS 参量化设计语言建立载荷的矩阵表格将空间域离散到时间域上,在不同时刻、不同位置提供相应的热流载荷输入,并设定一定的时间步长就可以模拟激光作用漆膜表面的温度场。

2 有限元分析模型

文中选用具有 3 维热分析能力的八节点六面体分析单元——SOLID70 进行分析。定义材料热物理参量后,进行网格划分(即模型的离散化)。定义边界元素的大小或数目是 ANSYS 分析的关键之一,因为这直接影响分析结果的准确性和经济性。由于激光作用的区域热量较大、作用时间短、热梯度较大,因此对该区域进行进一步的局部网格细化,以达到较高的计算精度^[20]。有限元模型如图 2 所示。图 2a 为模型的有限元网格划分图,图 2b 为图 2a 中矩形框标识处的局部放大后的网格划分图。图中 A 点作为漆膜的分析点,

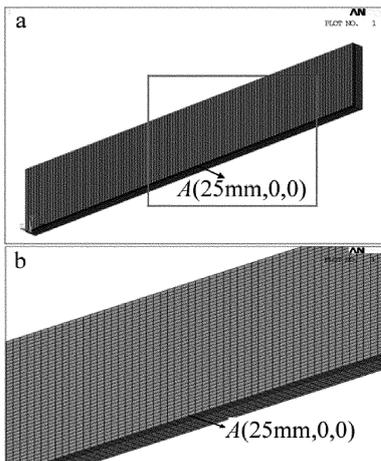


Fig. 2 Mesh of the sample

a—mesh of the model b—enlargement of the selected area in Fig. 2a

坐标为(25mm, 0, 0)。

模拟过程中基底材料选用不锈钢,长度 $L = 25\text{mm}$,宽度 $W = 16\text{mm}$,厚度 $H = 1\text{mm}$ 。漆膜喷在不锈钢的表面,厚度 $d = 0.05\text{mm}$,漆膜采用的是红漆。不锈钢与红漆的热物理参量如表 1 所示^[21-22],激光参量选取如表 2 所示。模拟过程中漆膜的初始温度设为 300K。

Table 1 Physical parameters of sample

material	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
stainless steel	7750	461	0.276
red paint	1300	2510	0.3

Table 2 Selected laser parameters during simulation

parameter	optional value						
w/mm	1.5						
pulse-width/ns	7						
f/Hz	1	2	3	4	5		
$E_d / (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2		
$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.6

3 有限元模拟结果分析

3.1 不同时刻的温度场分布

图 3a ~ 图 3c 为激光能流密度 $E_d = 1.2\text{J}/\text{cm}^2$ 、激光重复频率为 1Hz、扫描速率 $v = 3.5\text{mm}/\text{s}$ 时,漆膜表面温度场变化。激光源沿着漆膜表面 x 轴方向移动,材料表面的温度场分布随着激光源的移动而变化。由于漆膜的热传导系数较小,温度停留在 y 方向上 $-2.5\text{mm} \sim 2.5\text{mm}$ 范围之内。另外,当激光重复频率为 1Hz 时,激光每秒移动的距离(3.5mm)大于光斑半径($w = 1.5\text{mm}$),温度场分布内呈现出脉冲移动的痕迹。图 3d 所示为 $t = 8\text{s}$ 、激光重复频率为 $f = 8\text{Hz}$ 时的温度场分布。可见当激光重复频率变大时,单位时间内的脉冲数增加,出现温度累加效应,脉冲移动痕迹消

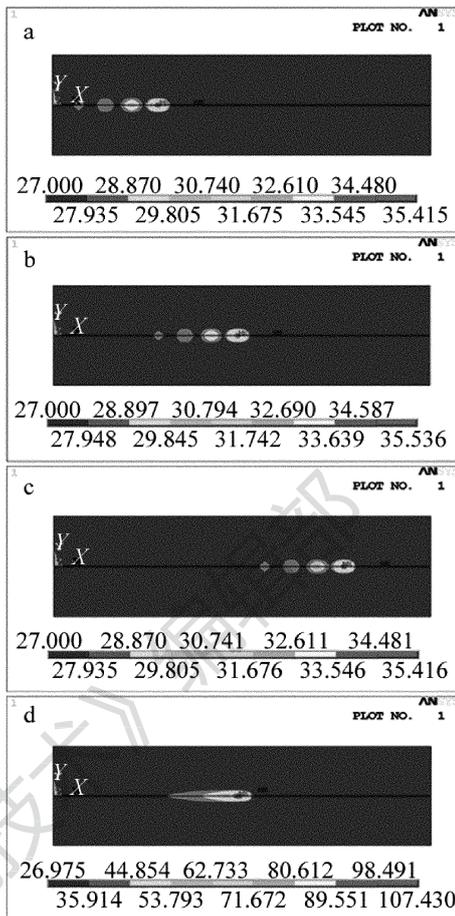


Fig. 3 Temperature distribution on the sample surface

a— $E_d = 1.2\text{J}/\text{cm}^2, t = 5\text{s}, v = 3.5\text{mm}/\text{s}, f = 1\text{Hz}$ b— $E_d = 1.2\text{J}/\text{cm}^2, t = 8\text{s}, v = 3.5\text{mm}/\text{s}, f = 1\text{Hz}$ c— $E_d = 1.2\text{J}/\text{cm}^2, t = 12\text{s}, v = 3.5\text{mm}/\text{s}, f = 1\text{Hz}$ d— $E_d = 1.2\text{J}/\text{cm}^2, t = 8\text{s}, v = 3.5\text{mm}/\text{s}, f = 8\text{Hz}$

失,温度场分布的边缘变的光滑,形状呈现为拖着尾巴的彗星状。

3.2 激光参量对温度分布的影响

3.2.1 激光能流密度的影响 图 4 为扫描速率 $v = 3.5\text{mm}/\text{s}$ 、激光重复频率 $f = 8\text{Hz}$ 时,不同激光能流密度作用下的温度场分布。图 4a 为 $t = 8\text{s}$ 时,漆膜表面沿 x 轴方向上温度变化曲线,从 $x = 0\text{mm}$ 到 $x = 25\text{mm}$ 位置,温度缓慢增加,在 $x = 25\text{mm}$ 时温度达到最大值,在 $25\text{mm} \sim 30\text{mm}$ 范围内温度迅速降低,即图中的曲线的斜率最大。图 4b 为漆膜表面上点 $A(25\text{mm}, 0, 0)$ 处温度随时间的变化曲线:漆膜表面的温度随着能流密度的增加而增加,温度曲线有些小的波峰出现,主要是由于热传导和温度累加性造成的。图 4c 为 $t = 8\text{s}$ 时,漆膜最高温度随激光能流密度的变化关系。随着激光能流密度的增加,漆膜的最高温度线性增加,这是由于激光能流密度影响单位时间内作用于漆膜单位面积上的能量,能流密度越大,辐照在单位面积漆膜表面的能量就越大,温度就越高^[23];直线右边实验图所对应是不同能流密度点处的除漆效果。由图 4c 可知,激光能

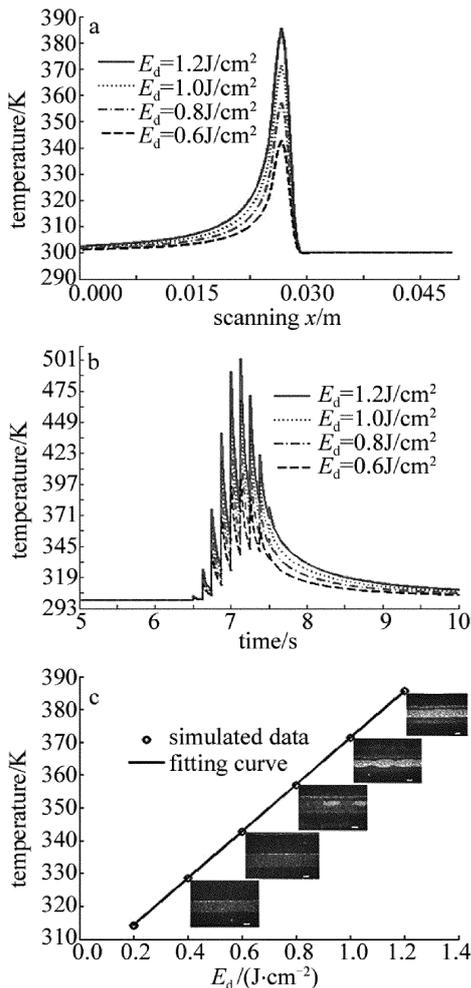


Fig. 4 Relationship among temperature, time and fluence

a—temperature vs. scanning path b—temperature vs. time at different fluence c—the simulated and fitted data of the highest temperature vs. fluence
流密度越大,除漆效果越明显。激光能流密度为 0.8 J/cm^2 时,油漆部分开始熔融;能流密度为 1.2 J/cm^2 时,基板开始损伤,并且有熔融现象。

3.2.2 激光扫描速率的影响 图5为激光能流密度为 $E_d = 1.2 \text{ J/cm}^2$ 、激光重复频率为 $f = 8 \text{ Hz}$ 时,不同扫描速率下的温度场分布。图5a为激光到达扫描路径中心点($x = 25 \text{ mm}$)处时,扫描路径上的温度变化。在到达温度最高点的位置($x = 25 \text{ mm}$)之前,温度梯度(曲线的斜率)随激光扫描速率的增加而减小,这是由于扫描速率越小,到达相同距离所需的时间越长,激光作用在漆膜的时间相对越长,温度上升就越快;经过最高温度的位置后,温度梯度随着扫描速率的增加而减少。图5b是漆膜表面上点A($25 \text{ mm}, 0, 0$)处温度随时间的变化曲线。随着扫描速率的增加,漆膜表面最高温度缓慢降低,最高温度之间的距离减小,温度峰值左移。由于随着激光速率的增大,在相同的距离内,所需的时间较短,故图中曲线中峰值会左移^[12]。图5c为漆膜最高温度随扫描速率的变化。由图5c可知,漆膜

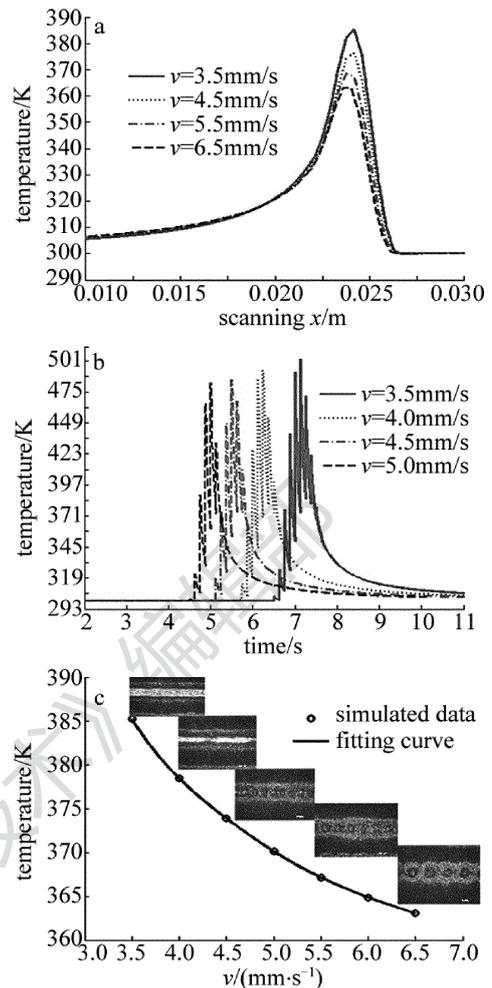


Fig. 5 Relationship among temperature, time and velocity

a—temperature vs. scanning path b—temperature vs. time at different velocities c—the simulated and fitted data of the highest temperature vs. velocity

的最高温度随扫描速率增加而递减,这主要是由于扫描速率较低时,相邻脉冲之间有了重叠,产生了温度累积效应。曲线右端所示为不同扫描速率下激光除漆的效果图。由实验图可知,随着扫描速率的增加,除漆效率逐渐降低,当扫描速率大于 4.5 mm/s 时,除漆效果已变得很差。这是由于扫描速率越大,相邻脉冲之间的间距越大,除漆效率降低,除漆的效果变差。

3.2.3 激光重复率的影响 图6为激光能流密度 $E_d = 1.2 \text{ J/cm}^2$ 、扫描速率 $v = 3.5 \text{ mm/s}$ 时,不同激光重复频率下的温度场分布变化。图6a为漆膜表面沿着x轴方向上温度变化曲线。随着激光重复频率的增大,漆膜表面的温度增加。这是由于激光重复频率越高,单位时间内的脉冲数就越多,在相同的移动速率下,作用在漆膜同一点处的脉冲数增加,漆膜吸收的激光能量增加,故温度会升高。同时,在激光重复频率 $f = 1 \text{ Hz}$ 时,在最高温度的左侧出现小的波峰,这主要是由于在相同的扫描速率下,激光重复频率越小,相邻脉冲之间的间距就会增加,不会发生脉冲重叠现象,因

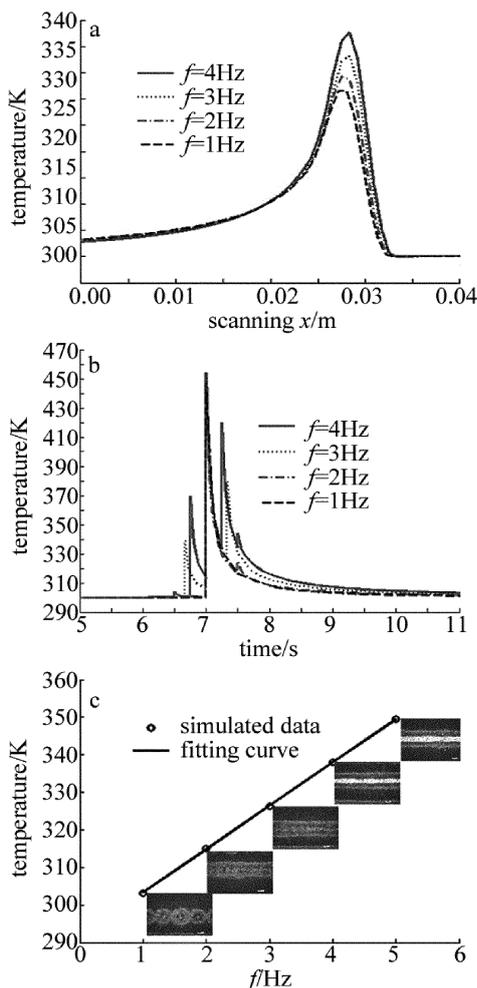


Fig. 6 Relationship among temperature, time and laser repetition rate
a—temperature vs. scanning path b—temperature vs. time at different f
c—the simulated and fitted data of the highest temperature vs. different f

此有小的波峰出现。而随着频率的增加,脉冲发生了重叠,当重叠的脉冲数增加时,波峰逐渐消失, $f=3\text{Hz}$ 以上基本为光滑曲线。图 6b 为漆膜表面上点 A (25mm,0,0) 处的温度随时间的变化曲线。随着激光重复频率的增大,漆膜表面的温度升高。频率越高,漆膜表面的温度开始增加的时间就越早。为了解释原因,取漆膜上邻近点 A (25mm,0,0) 的 B 点(两点之间的距离小于 3.5mm)。当激光第 1 个脉冲作用到 A 点之前,由于热传导,A 点处的温度在脉冲到达 B 点时已经开始增加。而且由于脉冲的累加效应,频率越高,作用在 B 点处的脉冲数就越多,A 点处的温度累加效果越明显。表现在图中就是温度开始增加的时间越早。图 6c 为漆膜表面最高温度随激光重复频率的变化。漆膜最高温度随激光重复频率的增加而线性增加。直线右端所示为不同激光重复率下的除漆的效果图,由图可知,随着激光重复率的增加大除漆效率增加,除漆效果变优。同时,由图 6c 和图 5c 对比可知,激光重复率与激光扫描的原理相似,都是基于脉冲重叠时的温

度的累积效应。故以下对比实验分析,只考虑扫描速率的情况。

4 实验验证

实验验证过程中,采用激光器为 Nd:YAG 激光器,脉冲宽度为 7ns,输出波长为 1064nm,激光光强空间分布为高斯型。样品选用涂有厚度 $d=0.05\text{mm}$ 的红色油漆的不锈钢板。利用 KEYENCE VHX-6003 维显微镜聚焦所观测处,调节微调旋钮,使样品从表面到激光烧蚀的最深处依次清晰,最终合成 3 维效果图。图 7 所示为激光输出能流密度 $1.2\text{J}/\text{cm}^2$ 、激光扫描速率为 $3.5\text{mm}/\text{s}$ 、激光重复率为 8Hz 时的激光除漆显微镜 3 维效果图。沿着扫描路径,形成一条除漆“通道”。通道的宽度为 0.18mm,深度为 0.0438mm,长度为 0.61mm。以此通道的体积最为油漆的去除量,计算可得油漆去除体积大约为 0.0048mm^3 。

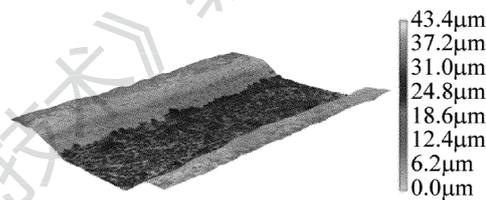


Fig. 7 3-D graph of laser removal of paint

以上述实验条件为基准,分别研究了高重复率激光移动扫描除漆与单脉冲下激光移动固定距离的除漆量。即前者是激光以固定激光重复频率($f=8\text{Hz}$),扫描速率依次取 $3.5\text{mm}/\text{s}$, $4\text{mm}/\text{s}$, $4.5\text{mm}/\text{s}$, $5\text{mm}/\text{s}$, $5.5\text{mm}/\text{s}$ 作用在油漆的表面;后者是激光以单脉冲($f=1\text{Hz}$),依次移动固定的距离,从而使与前者相邻脉冲之间的间距相同。在单脉冲的情况下,增加脉冲作用在漆膜上的时间间隔,而高重复频率的情况下脉冲的时间间隔较短,通过这两种情况可以对比脉冲的叠加效应,从而验证温度的累加性,相应的分析结果如图 8 所示。激光相对除漆量随着扫描速率的增加而降低,高重复频率激光移动扫描除漆比单脉冲下激光移动固定的距离的相对除漆量要大,而且两种情况下相

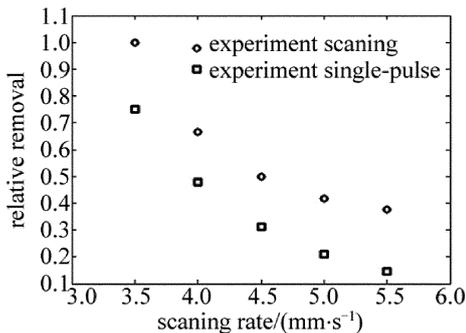


Fig. 8 Relationship between relative removal and scanning rate

对除漆量之差随着扫描速率的增加而增大。由此表明,高重复率下,相邻脉冲之间发生了重叠,由于温度的累积效应,油漆的相对去除量会明显增加。这与模拟的结论吻合。图9为油漆的相对去除量与激光能流密度的变化关系。由图可以看出,油漆的去除量与激光能流密度基本呈现线性变化关系,即激光能流密度越大,油漆相对去除量增加,除漆效率增加。

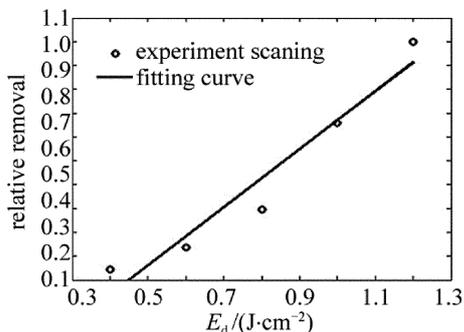


Fig. 9 Relationship between relative removal and fluence

5 小结

在脉冲激光除漆的温度场模拟过程中,综合考虑了热传导、对流对温度场影响,采用基模高斯型的热源形式,建立3维瞬态温度有限元分析模型,并使用该模型分析了激光作用漆膜表面的温度场分布。主要得到以下结论:(1)在移动纳秒激光源的作用下,漆膜表面温度分布呈现带尾巴的彗星状,显示出激光脉冲移动痕迹;(2)研究了激光参量(激光能流密度、扫描速率以及激光重复频率)对温度场变化的影响,其中漆膜表面的温度随着激光能流密度和激光重复频率的增大而线性增大,而随着扫描速率的增大指数递减;(3)高重复率下的激光扫描除漆比单脉冲激光移动固定距离的除漆效果要好,激光能流密度和激光重复率越大而激光扫描速率越小时,激光除漆效率越高。温度的累加效应可以提高除漆的效率。

以上结论可以为实际的激光除漆过程中参量选取提供参考。

参 考 文 献

[1] NEVRS P, ARRONTE M, VILAR R, *et al.* KrF excimer laser dry and steam cleaning of silicon surfaces with metallic particulate contaminants[J]. *Applied Physics*, 2002, A74(2): 192-194.

[2] ASMUS J F. Non-divestment laser applications in art conservation [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, 4(s1): 289-293.

[3] ZHU Y F, TAN R Q. Graffiti removal-new applications of laser cleaning[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(8): 840-844 (in Chinese).

[4] ZHAO Z M. The application of laser cleaning technology in microelectronics industry field[J]. *Cleaning Technology*, 2004, 2(8): 29-34 (in Chinese).

[5] BARLETTA M, GISARIO A, TAGLIAFERRI V. Advance in paint

stripping from aluminium substrates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 173(2): 232-239.

[6] SCHWEIZER G, WERNER L. Industrial 2kW TEA CO₂ laser for paintstripping of aircraft[J]. *Proceedings of the SPIE*, 1995, 2502: 57-62.

[7] CHEN G X, KWEE T J, TAN K P, *et al.* Laser cleaning of steel for paint removal[J]. *Applied Physics*, 2010, A101(2): 249-253.

[8] BRYGO F, DUTOUQUET C, le GUERN F, *et al.* Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(6): 2131-2138.

[9] BRYGO F, SEMEROK A, OLTRA R, *et al.* Laser heating and ablation at high repetition rate in thermal confinement regime[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(23): 8314-8318.

[10] TEULE R, SCHOLTEN H, van den BRINK O F, *et al.* Controlled UV laser cleaning of painted artworks: a systematic effect study on egg tempera paint samples[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, 4(s1): 209-215.

[11] CIOFINI D, OSTICIOLI I, PAVIA A, *et al.* Removal of overpaintings from easel paintings using QSW Nd:YAG laser[J]. *Applied Physics*, 2014, A117(1): 341-346.

[12] ZHOU G L, KONG L B, SUN H Y, *et al.* Finite element analysis of temperature field based on ANSYS in laser cleaning mold[J]. *Manufacturing Automation*, 2008, 30(9): 90-92 (in Chinese).

[13] MENG Q R, ZOU Y, JIA S K, *et al.* Effect of laser remelting on heat insulation performance of plasma sprayed ZrO₂-20% Y₂O thermal barrier coatings[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(7): 079001 (in Chinese).

[14] YANG J, HAN J H, DUAN T, *et al.* Mechanical analysis of paint film stripping from aluminum plate surface by means of nanosecond laser[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6): 718-722 (in Chinese).

[15] XIAN H, FENG G Y, WANG S P, *et al.* Laser transmission model in paint and related experimental[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2012, 49(5): 1036-1042 (in Chinese).

[16] YUAN W, LI Z G, CAI Y G, *et al.* Simulation of ANSYS-based laser cutting temperature field[J]. *Journal of Changchun University*, 2013, 23(12): 1561-1564 (in Chinese).

[17] JIAO J, WANG X. A numerical simulation of machining glass by dual CO₂-laser beams[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(2): 297-301.

[18] DONG Z B, WEI H Y, LIU R P, *et al.* The simulation of welding temperature at 3-D field on the stainless steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, 25(2): 9-14 (in Chinese).

[19] FENG Y S, LI X X. ANSYS numerical simulation of temperature field in silica glass irradiated by pulsed laser [J]. *Physics Experimentation*, 2012, 32(2): 35-38 (in Chinese).

[20] WEN Y, YAN J X. The simulation study of interaction of laser with material based on ANSYS[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(s1): 250-253 (in Chinese).

[21] YANG S M, TAO W Q. Heat transfer[M]: 4rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1998: 555-556 (in Chinese).

[22] SONG F, ZOU W F, TIAN B, *et al.* Model of one-dimensional thermal stress applied in paint removal by Q switched short pulse laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 34(11): 1577-1581 (in Chinese).

[23] JIAO J, WANG X. Cutting glass substrates with dual-laser beams [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(7/8): 860-864.