

高重复频率脉冲激光去除低热导率涂漆

张志研^{1,2,3***}, 王奕博², 梁浩², 赵树森², 林学春^{2**}, 李新阳^{1*}

¹中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院半导体研究所全固态光源实验室, 北京 100083;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于烧蚀气化材料去除机理, 利用高重复频率脉冲激光对低热导率树脂基涂漆的定量去除进行理论及实验研究。研究了二维振镜系统激光清洗扫描方式的选取, 以及脉冲激光作用于材料表面光斑的分布特性。对材料表面的温度变化进行理论仿真后发现, 脉冲间隔对材料温度变化的影响较小。进行了高重复频率脉冲激光烧蚀气化去除低热导率涂漆的实验, 结果表明: 作用于涂漆表面的脉冲数与烧蚀气化去除深度线性相关, 从而建立了二者之间的一维线性关系方程。

关键词 激光技术; 激光清洗; 烧蚀气化; 高重复频率; 涂漆

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0102009

Removal of Low Thermal Conductivity Paint with High Repetition Rate Pulse Laser

Zhang Zhiyan^{1,2,3***}, Wang Yibo², Liang Hao², Zhao Shusen², Lin Xuechun^{2**}, Li Xinyang^{1*}

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Laboratory of All-Solid-State Light Source, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the mechanism of ablation, we study the quantitative removal of low thermal conductivity resin-based paint with high repetition rate pulse laser. The selection of scanning mode of a two-dimensional galvanometer system is studied, as well as the distribution characteristics of laser spots on material surface. The temperature change of material surface is simulated and it is found that the pulse interval has little influence on the material temperature change. The experiments of high repetition rate pulse laser ablating low thermal conductivity paint are carried out. The relation between the pulse number acting on paint surface and the ablation depth is linear, and a linear equation is established.

Key words laser technique; laser cleaning; ablation; high repetition rate; paint

OCIS codes 140.3390; 140.3330; 140.3538

1 引言

激光清洗是一种先进的绿色清洗技术。与机械打磨清洗相比, 激光清洗属于非接触无应力清洗, 对基材的损伤极小。与化学清洗相比, 激光清洗不需要清洗介质, 清洗过程中只产生少量粉尘, 对环境污

染小^[1-2]。激光源通过光纤柔性传输、配备机械臂等自动化设备、精确控制激光能量及相关工艺参数, 可实现污染物的定点、定量去除, 实现清洗过程的自动化及智能化。

Schawlow^[3]曾利用激光进行材料表面污染物的去除实验。受清洗用激光源的限制, 激光清洗技

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-09-17; 录用日期: 2018-09-30

基金项目: 国家重点研发计划(2017YBF0405100)

* E-mail: xyli@ioe.ac.cn; ** E-mail: xclin@semi.ac.cn; *** E-mail: zyzhang@semi.ac.cn

术在工业中未得到广泛应用,主要原因是清洗效率较低,设备成本较高(激光源价格昂贵),清洗工艺相对复杂。但近年来,随着激光技术的发展,尤其是脉冲激光技术的快速发展,激光清洗技术再次得到了广泛关注^[4-5]。

高重复频率(千赫兹量级)、百纳秒(≈ 100 ns)脉冲激光是目前研究及应用较为广泛的一类清洗用激光源,这是因为:1)纳秒级脉冲激光能量作用于基材表面,基材受热积累的影响较小;2)材料吸收高重复频率脉冲激光后,热在材料表面的污染物中快速积累,很快达到污染物的去除阈值;3)此类脉冲激光可以实现光纤的远距离柔性传输,可大大提高其工业实用性。在使用脉冲激光进行污染物清洗去除的过程中,不同类型的脉冲激光源清洗不同属性的污染物的机理也不尽相同,或为多机理并存,主要包括热膨胀振动效应、烧蚀气化效应、等离子冲击破坏效应和光压破坏效应等^[6-8]。

利用激光定量、精确去除材料表面的保护漆是激光清洗技术的重要应用之一^[9-10],在高速列车底部重点焊缝去漆检修、飞机大修中蒙皮脱漆及军用装备功能性涂层定期换装等应用中具有广阔的前景。保护漆通常是覆盖在物体表面,起保护、装饰及其他特殊用途的化学混合物,主要由成膜物质、次要成膜物质和辅助成膜物质组成,属于有机高分子材料,其导热性能较差,属于低热导率材料。利用高重复频率、百纳秒激光去除基材表面涂漆的主要机理为涂漆类材料吸收瞬时高能激光后形成快速烧蚀气化效应^[11]。

脉冲激光烧蚀气化去除材料的基本物理过程可以描述为:若干脉冲用来提供基础热量,并作用于材料表面,材料迅速升温,形成局部高温区域(激光的功率、能量分布、作用时间及材料的热物理属性是局部高温区域形成的基本控制参数);后续激光脉冲与局部高温区域作用,污染物的表层迅速形成烧蚀气化匙孔;脉冲激光与污染物内部作用,匙孔对热扩散具有抑制作用,使烧蚀气化效应加剧。

本文针对激光清洗技术在涂漆去除中的重要应用需求,基于激光清洗过程中的烧蚀气化去除机理,对低热导率树脂基涂漆吸收高重复频率脉冲激光后烧蚀气化的升温过程进行仿真及分析,结果发现,涂漆吸收脉冲数与被烧蚀气化去除深度表现为一维线性相关。之后通过工艺实验对仿真结果进行了验证。在保证基材无损的情况下,通过激光进行污染物烧蚀气化去除以及多层污染物逐层定量去除,是激光清洗技术的重要应用方向,对用脉冲激光实现

精确可控的污染物清洗去除具有一定的指导意义。

2 二维扫描激光清洗系统的搭建与特性分析

2.1 二维扫描激光清洗系统的搭建

实验所用二维扫描激光清洗系统如图 1 所示,清洗光源为 YLPN 型 30 W 高重复频率脉冲激光器。在输出最高平均功率为 30 W 的情况下,该激光器脉冲宽度的调节范围为 8~200 ns,重复频率的调节范围为 30~300 kHz。激光束准直后,激光光斑的半径 R 约为 3.5 mm,发散角 β 约为 0.29 mrad。准直器输出的平行光束通过二维扫描振镜系统后实现样件表面的全覆盖二维扫描清洗,二维扫描振镜系统聚焦场镜的等效焦距为 85 mm。

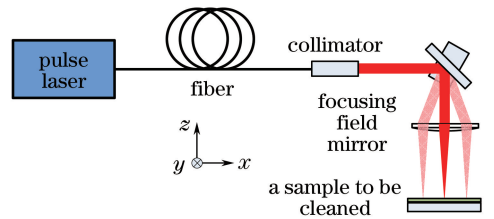


图 1 激光清洗系统原理图

Fig. 1 Schematic of experimental setup for laser cleaning

清洗用脉冲激光在待清洗样件表面的聚焦光斑直径 d 为

$$d = \frac{2 \times M_{\text{BPP}}}{\alpha}, \quad (1)$$

式中: M_{BPP} 为脉冲激光光束的参数积, $M_{\text{BPP}} = R \cdot \beta$; α 为加工用聚焦光束的入射角度,这里取 α 为 0.04 rad。

通过计算可知,系统清洗用脉冲激光在待清洗样件表面的聚焦光斑直径 d 约为 50.8 μm 。对清洗样件表面的激光光斑进行实际测量后可知聚焦光斑直径 d 约为 50 μm ,与计算值相符,如图 2 所示。清

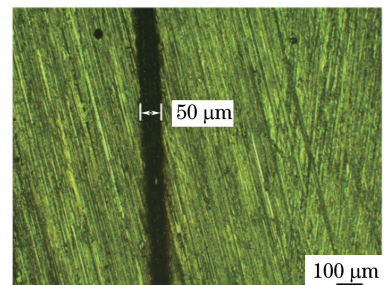


图 2 清洗用脉冲激光聚焦光斑的测量结果

Fig. 2 Measured diameter of pulse laser focusing spot for cleaning

洗用脉冲激光的光斑尺寸是后续数值仿真及工艺实验必需的重要参数。

2.2 二维扫描激光清洗系统光斑的重叠特性及控制

通过设置参数可以使聚焦光斑实现多种方式的二维扫描,用于去除样件表面的污染物。本实验选

取“弓”字型扫描方式,因为相对于“之”字形扫描及“回”字形扫描,该扫描方式可以实现 x 向和 y 向两个方向的均匀光斑覆盖,可以提高清洗效果。图 3 所示为二维激光扫描清洗系统的“弓”字型扫描方式示意图以及光斑空间分布示意图。

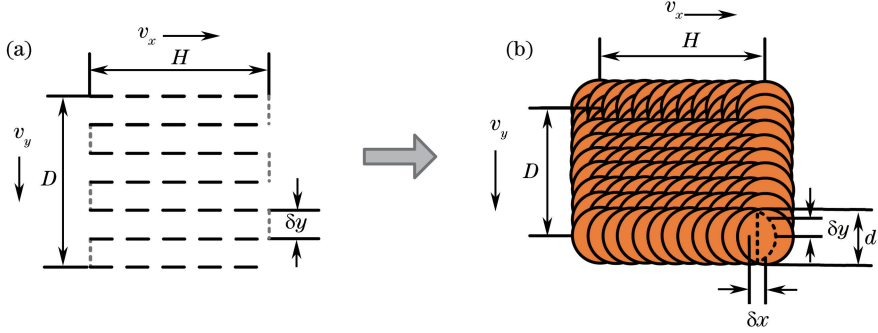


图 3 激光清洗光斑的空间分布示意图。(a)光斑运动轨迹;(b)光斑重叠图

Fig. 3 Schematics of spatial distribution of laser spots. (a) Moving trail of laser spots; (b) schematic of laser spots overlap

清洗用高重复频率脉冲激光源的重复频率为 f ; x 方向的扫描速率为 v_x , 扫描距离为 H , 脉冲光斑之间的距离为 δx ; y 方向的平移速率为 v_y , 平移距离为 D , 脉冲光斑之间的距离为 δy 。

在进行二维扫描去除涂漆的过程中,作用于 x 方向的脉冲总数可表示为

$$N_x = \frac{H}{v_x} \cdot f, \quad (2)$$

作用于 x 方向的脉冲光斑之间的距离为

$$\delta x = v_x \cdot \frac{1}{f}, \quad (3)$$

作用于 y 方向的脉冲总数为

$$N_y = \frac{D}{\delta y}. \quad (4)$$

在使用二维扫描振镜激光清洗系统进行材料的烧蚀气化去除时,为了保证 x 方向及 y 方向具有相同的光斑重叠率, y 方向的填充距离 δy 应等于 x 方向脉冲光斑之间距离 δx , 这样就可可在 x 、 y 两个方

向上形成均匀性一致的激光清洗表面质量,为后续改变二维平面内脉冲数密度进行低热导率涂漆烧蚀气化去除深度规律的研究提供了一致性条件。

2.3 高重复频率脉冲激光烧蚀气化低热导率涂漆的过程分析

在使用高重复频率脉冲激光烧蚀气化低热导率涂漆的过程中,做出如下假设:1)激光与材料的相互作用以材料吸收高能激光后瞬时烧蚀气化去除机理为主,材料吸收的能量全部转化为热量^[12];2)脉冲激光的作用对象为各向同性材料,材料的热物理属性为线性;3)单次去除对象的厚度 h_{\max} 远小于作用于材料表面的激光光斑直径 d 。因此,激光清洗过程可简化为只考虑深度方向(z 方向)热传导的一维线性傅里叶热传导问题^[13]。图 4(a)所示为具有高斯能量分布的圆形光斑激光热源作用于涂漆表面的尺寸参数及坐标方向示意图,温度分布曲线为高斯能量分布的圆形光斑激光热源作用于涂漆表面时,

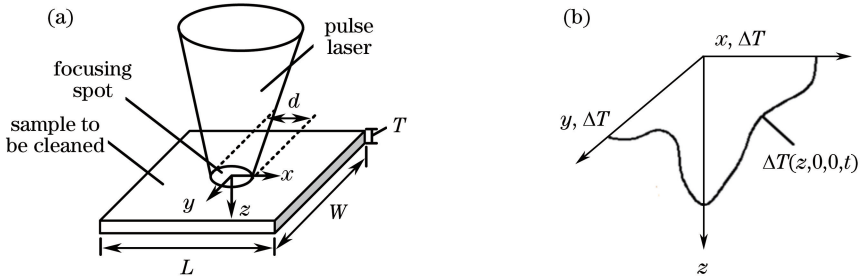


图 4 脉冲激光作用于涂漆表面的示意图。(a)涂漆表面的尺寸参数及坐标方向;(b)涂漆表面的温升

Fig. 4 Schematics of pulse laser act on paint surface. (a) Size parameters and coordinate direction of paint surface; (b) temperature rise of paint surface

x, y, z 三个方向的温升变化示意图,如图 4(b)所示,其中 $\Delta T(z, 0, 0, t)$ 为时间为 t 时、深度方向位置 z 处涂漆的温升。

利用 ANSYS 软件对高重复频率纳秒脉冲激光烧蚀气化树脂基涂漆的温升过程进行模拟仿真。树脂基涂漆材料的热物理属性如表 1 所示^[14-15],涂漆对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光波长的吸收率参考热塑性非金属材料

表 1 树脂基涂漆材料的热物理属性

Table 1 Thermo-physical properties of resin-based paint

Density / ($10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Thermal conductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Specific heat capacity / ($10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Boiling point /K	Absorption coefficient	Length \times width \times thickness / (mm \times mm \times mm)
1.45	0.3	2.5	≈ 623	0.3	1 \times 1 \times 0.1

表 2 清洗用高重复频率纳秒脉冲激光源的参数

Table 2 Parameters of high frequency nanosecond pulse laser

Laser power /W	Repetition rate /kHz	Pulse width /ns	Spot diameter /mm	Energy distribution	Pulse number
10	30	200	0.05	Gaussian	2

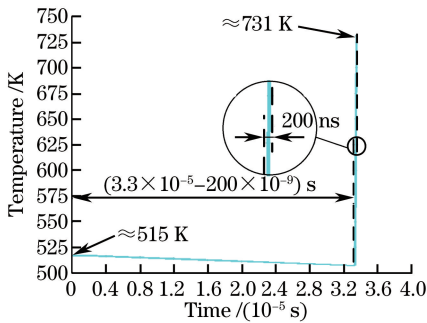


图 5 两个相邻激光脉冲作用于涂漆表面后,涂漆表面光斑作用中心位置的温度变化(涂漆的初始温度为 293 K)
Fig. 5 Temperature elevation at the center of the spots after two adjacent pulse lasers absorbed by the paint (the initial temperature of paint is 293 K)

由仿真结果可知,当涂漆初始温度为 293 K 时,第一个激光脉冲被涂漆吸收后,涂漆表面光斑作用中心的温度在 200 ns 内(脉冲宽度)迅速上升到约 515 K。由于树脂基涂漆的热导率很低,在第二次激光脉冲到达之前,激光加热后的涂漆温度几乎保持不变,不会因材料间的热传导而迅速降低。第二个脉冲作用于涂漆表面的同一位置,继续加热涂漆,两激光脉冲之间的间隔时间为 $\left(\frac{1}{f} - \tau\right) = (3.3 \times 10^{-5} - 200 \times 10^{-9}) \text{ s}$,其中 τ 为脉冲激光的脉冲宽度。

脉冲激光继续作用于涂漆表面,涂漆的瞬时温度达到近 731 K,此时会产生过热环境,出现烧蚀气化^[16]。通常,单个脉冲不能使涂漆达到其烧蚀气化所需的沸点,首脉冲仅用于加热涂漆使其温度升高,

料在 $1.06 \mu\text{m}$ 波长位置的典型吸收系数。使用该吸收系数进行仿真,可完全反映涂漆在纳秒脉冲激光作用下的温度变化规律。清洗用高重复频率纳秒脉冲激光源的参数如表 2 所示。涂漆的初始温度为 293 K,两个相邻高斯能量分布脉冲激光作用于涂漆表面后,涂漆表面光斑作用中心位置温度变化的仿真结果如图 5 所示。

后续脉冲继续作用于涂漆表面,用于烧蚀气化涂漆,涂漆被去除一定深度,如图 6 所示。

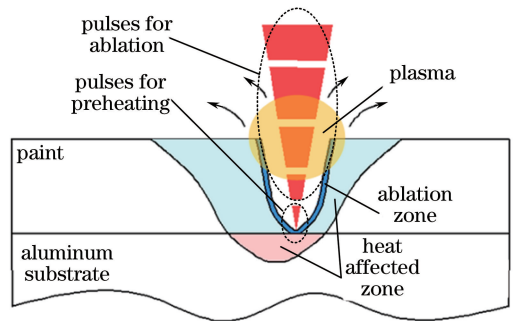


图 6 脉冲激光清洗原理图

Fig. 6 Diagram of pulse laser cleaning

3 激光烧蚀气化去除低热导率涂漆的实验

3.1 实验样件

清洗用实验样件如图 7 所示:基材为铝合金(6061)材料,厚度为 2 mm;涂漆为丙烯酸酯类材料,厚度约为 $180 \mu\text{m}$ 。

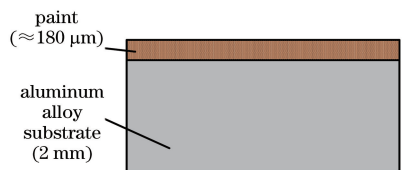


图 7 激光去除涂漆实验样件示意图

Fig. 7 Schematic of sample used in laser cleaning experiment

3.2 激光烧蚀气化去除实验

通过改变 x 方向的扫描速率,构建了作用于材料表面不同脉冲数下树脂基低热导率涂漆的烧蚀气化工艺方案。为了使 x 扫描方向与 y 扫描方向具

有相同的光斑重叠率,对 y 方向的光斑填充距离进行调整,工艺方案如表 3 所示。采用表 3 所列实验方案及工艺参数烧蚀气化铝合金表面的树脂基涂漆,实验结果如图 8 所示。

表 3 脉冲激光烧蚀气化去除涂漆实验方案

Table 3 Experimental scheme for removing paint by pulse laser

Number	Laser power /W	Pulse width /ns	Repetition rate /kHz	$v_x /(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$\delta y / \text{mm}$	Spot diameter /mm
1-2 #	30	200	30	400	0.013	0.05
1-3 #	30	200	30	600	0.020	0.05
1-4 #	30	200	30	800	0.027	0.05
1-5 #	30	200	30	1000	0.033	0.05
1-6 #	30	200	30	1200	0.040	0.05
1-7 #	30	200	30	1400	0.047	0.05
1-8 #	30	200	30	1600	0.053	0.05
1-9 #	30	200	30	1800	0.060	0.05

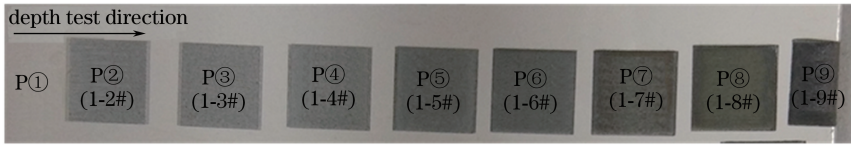


图 8 激光烧蚀气化去除涂漆的实验结果

Fig. 8 Experimental results of ablation paint by laser

3.3 实验结果分析

作用于材料表面的脉冲总数 N 为

$$N = N_x \times N_y. \quad (5)$$

表 4 脉冲激光去除涂漆过程中作用于涂漆表面的脉冲数

Table 4 Pulse numbers applied to paint surface in pulse laser cleaning experiment

Number	Scanning range / (mm × mm)	Pulse number in x -direction	Pulse number in y -direction	Total number of pulses
1-2 #	6 × 6	450	462	207900
1-3 #		300	300	90000
1-4 #		225	222	49950
1-5 #		180	182	32760
1-6 #		150	150	22500
1-7 #		129	128	16512
1-8 #		113	113	12769
1-9 #		100	100	10000

使用型号为 Tencor KLA-Tencor P-6 的台阶仪测量涂漆烧蚀气化的深度,深度测量探针的扫描方向如图 8 左上方的箭头所示,测量结果如图 9 所示。可以看出,随着扫描速率减小,即作用于涂漆表面的脉冲增多,涂漆被脉冲激光烧蚀气化的深度增加。

如图 10 所示,将作用于材料表面的脉冲总数与烧蚀气化深度进行对比可以发现,区域②、③、④、⑤、⑥、⑦、⑧的烧蚀气化深度与作用于涂漆表面脉

根据(2)式及(4)式,分别计算实验过程中作用在 x 方向的脉冲数 N_x 和作用在 y 方向的脉冲数 N_y ,结果如表 4 所示。

冲数的一维线性相关性较高。但是,相对于其他区域,区域⑨的烧蚀气化深度值偏离线性预测值非常严重,这主要是因为区域⑨涂漆烧蚀气化深度约为 $180 \mu\text{m}$,涂漆已全部被去除,因此部分脉冲能量直接作用于铝合金基材表面,对基材产生了热影响,甚至是破坏。因此,将区域⑨烧蚀气化深度的测试结果予以剔除,对其他区域烧蚀气化深度与脉冲数之间进行线性拟合,结果如图 11 所示,拟合的相关系数为 0.995。

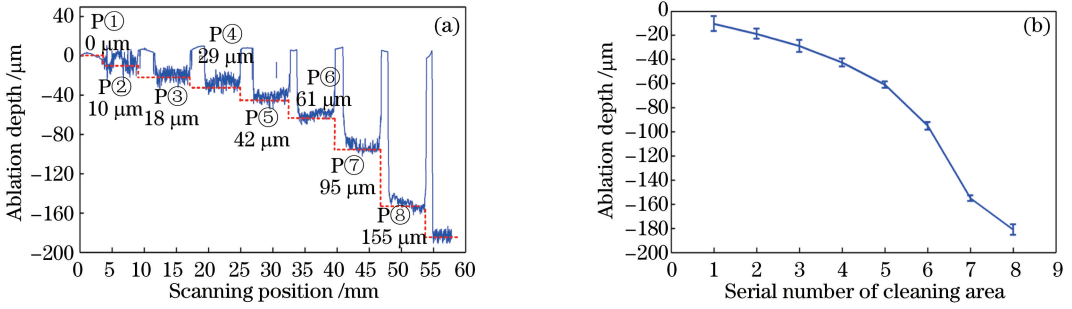


图 9 不同扫描速率下激光烧蚀气化深度的测试结果。(a)烧蚀气化深度的测试结果;(b)测试结果的标准差

Fig. 9 Measured ablation depth at different scanning speeds. (a) Measured ablation depth; (b) standard deviations of measured ablation depth

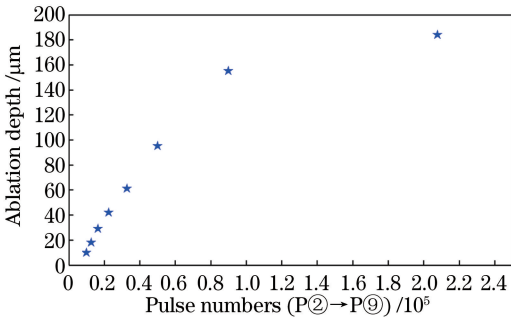


图 10 作用于涂漆表面的脉冲数与涂漆被烧蚀气化深度之间的关系

Fig. 10 Relationship between pulse numbers acting on paint surface and ablation depth of paint

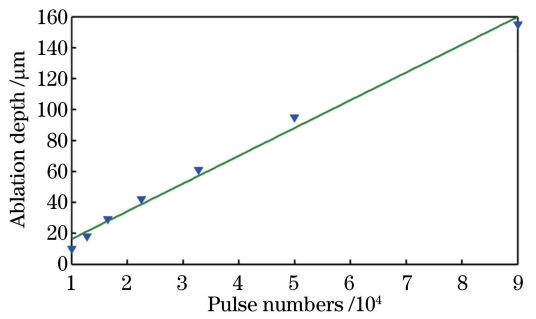


图 11 作用于涂漆表面的脉冲数与涂漆被烧蚀气化深度之间的线性拟合结果

Fig. 11 Linear fitting results of pulse numbers acting on paint surface and ablation depth of paint

4 激光去除低热导率涂漆实验方案的优化

在脉冲激光烧蚀气化涂漆过程中,为避免烟尘及等离子体对涂漆吸收脉冲激光的影响,在后续的优化实验中加入高压气体。为了避免作用于涂漆表面的脉冲激光数超过涂漆被全部烧蚀气化去除所需的脉冲数,造成脉冲能量浪费,或对基材造成破坏,根据图 10 所示的结果,将作用于材料表面最高总脉

冲数设定为约 10^6 个,其他工序脉冲总数依次递减,去除涂漆的优化实验方案如表 5 所示,作用于涂漆表面的脉冲数如表 6 所示。根据表 5 所示的工艺实验方案,进行涂漆烧蚀气化去除实验,结果如图 12 所示。图 13 所示为工艺调整后不同数量激光脉冲作用于涂漆表面时涂漆烧蚀气化深度的测量结果。图 14 所示为工艺调整后作用于涂漆表面不同脉冲数与涂漆被烧蚀气化深度之间的线性拟合结果,线性拟合的相关系数为 0.995。

表 5 脉冲激光烧蚀气化去除涂漆的优化实验方案

Table 5 Improved experimental scheme for removing paint by pulse laser

Number	Laser power /W	Pulse width /ns	Repetition rate /kHz	$v_x /(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$\delta y / \text{mm}$	Spot diameter /mm
2-2 #	30	200	30	547	0.018	0.05
2-3 #	30	200	30	586	0.02	0.05
2-4 #	30	200	30	636	0.02	0.05
2-5 #	30	200	30	700	0.023	0.05
2-6 #	30	200	30	789	0.026	0.05
2-7 #	30	200	30	923	0.031	0.05
2-8 #	30	200	30	1161	0.039	0.05
2-9 #	30	200	30	1800	0.06	0.05

表 6 脉冲激光去除涂漆过程中在涂漆表面的脉冲数

Table 6 Pulse numbers applied to paint surface during pulse laser cleaning experiment

Number	Scanning range / (mm×mm)	Pulse number in		Total number of pulses
		x-direction	y-direction	
2-2 #	6×6	329	329	108241
2-3 #		307	307	94249
2-4 #		283	283	80089
2-5 #		257	257	66049
2-6 #		228	228	51984
2-7 #		195	195	38025
2-8 #		155	155	24025
2-9 #		100	100	10000

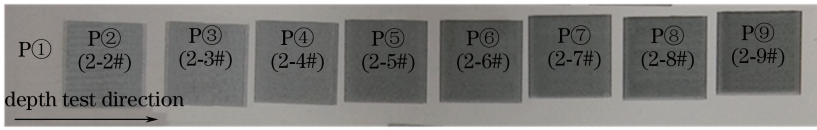


图 12 工艺调整后不同激光脉冲数烧蚀气化去除涂漆的实验结果

Fig. 12 Experimental results of ablation with different numbers of laser pulse after process adjustment

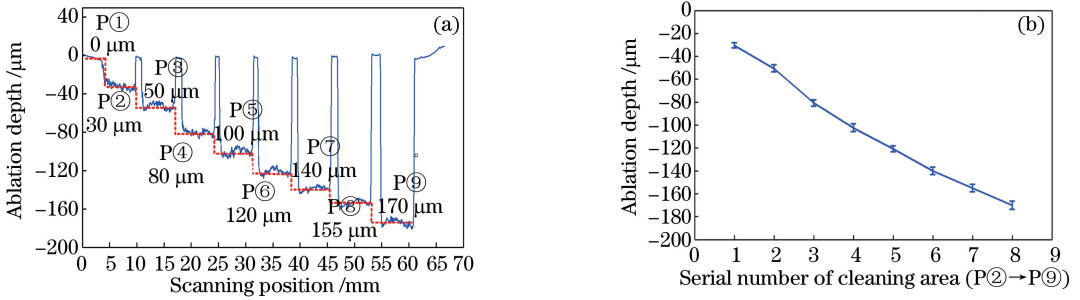


图 13 工艺调整后不同扫描速率下激光烧蚀气化深度的测试结果。(a)烧蚀气化深度的测试结果;(b)测试结果标准差

Fig. 13 Measured ablation depth at different scanning speeds after the process adjustment.

(a) Measured ablation depth; (b) standard deviation of test results

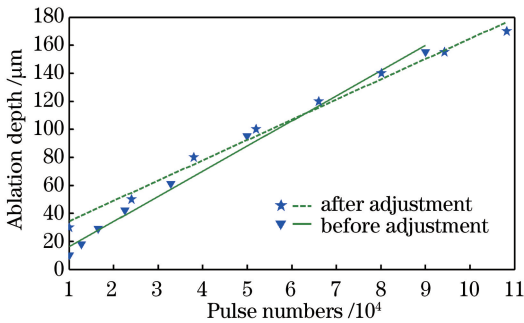


图 14 工艺调整前后作用于涂漆表面的脉冲数与涂漆被烧蚀气化深度之间的线性拟合结果

Fig. 14 Linear fitting results of pulse numbers acting on paint surface and ablation depth of paint before and after the process adjustment

以上实验结果表明,脉冲激光烧蚀气化去除涂漆的深度值与作用涂漆表面的脉冲数成一维线性相关关系。由于所用的脉冲激光具有较高的重复频

率,故可忽略用于提供基础温度的脉冲数。因此,高重复频率脉冲激光烧蚀气化去除涂漆深度值 H_{total} 与作用涂漆表面(面积为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$)的脉冲总数 N 之间的关系可表示为

$$H_{total} = H_0 \cdot N, \quad (6)$$

式中: H_0 为当材料达到烧蚀气化临界值后,后续平均每个脉冲的烧蚀气化深度值。

实验使用的是高重复频率的脉冲激光,因此想通过实验精确区分得到 H_0 比较困难,而通过所提实验方案采用一维线性拟方法可以近似得到 H_0 。在优化前的实验方案中,得到 $H_0 = 0.001795\ \mu\text{m}$;在优化后的实验方案中,得到 $H_0 = 0.001446\ \mu\text{m}$,即得到了在 30 W 、 30 kHz 、 200 ns 脉冲激光作用下,单个脉冲烧蚀气化涂漆的平均深度值。

将作用于面积为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的涂漆表面的脉冲总数 N 转换为单位面积脉冲密度 n' ,即

$$h_{\text{total}} = h_0 \cdot n', \quad (7)$$

式中: $n' = \frac{N \cdot \pi \cdot d^2 / 4}{36 \times 10^6}$; h_{total} 为单位面积的总烧蚀气化深度; h_0 为当材料达到烧蚀气化临界值后, 单位面积上后续每个脉冲烧蚀气化深度的平均值。

利用高重复频率脉冲激光烧蚀气化低热导率的涂漆时, 激光烧蚀气化去除涂漆深度与作用于材料表面的脉冲数线性相关的主要原因为: 在激光脉冲作用于低热导率材料表面的脉冲发射间隔期, 涂漆温度无较大变化, 实验结论与仿真分析结果吻合。

对比调整前后的工艺方案可以发现: 1) 当作用于材料表面的脉冲数较少时, 即在涂漆烧蚀气化去除的初始阶段, 添加辅助气体后的烧蚀气化深度较不添加辅助气体的更大, 且线性一致性较好, 认为辅助气体有助于脉冲激光对涂漆产生初始热烧蚀; 2) 当作用于材料表面的脉冲数较多时, 添加辅助气体较不添加辅助气体的烧蚀气化深度增大值比脉冲数较少情况下的值低, 且两种情况下烧蚀气化深度增大的线性一致性相似, 故认为, 当采用较多脉冲数进行涂漆烧蚀气化去除时, 辅助气体对增大烧蚀气化深度有一定作用, 但对于调整线性曲线的效果不明显。因此, 在进行涂漆的定量去除时, 为了保证最大深度及工艺重复一致性的线性逐层定量去除涂漆, 应单次采用适当数量的脉冲数, 并添加辅助气体。

5 结 论

基于激光清洗烧蚀气化去除材料的机理, 使用高重复频率脉冲激光对低热导率树脂基涂漆的定量去除进行理论及实验研究。采用二维振镜进行激光清洗时, 分析了扫描方式对激光清洗表面质量的影响; 通过控制 x 向和 y 向两个方向的光斑重叠率, 得到了在“弓”字型扫描方式下, 两个方向具有相同重叠率的计算方法。通过对高重复频率脉冲激光烧蚀气化低热导率材料的温升过程进行模拟仿真发现, 脉冲间隔对材料温度变化的影响较小。使用高重复频率、百纳秒脉冲激光对树脂基低热导率涂漆进行烧蚀气化去除实验, 通过优化实验方案得到了作用于树脂基涂漆表面脉冲数与烧蚀气化去除深度之间的一维线性关系曲线, 并建立了低热导率材料烧蚀气化深度与作用于其表面脉冲总数之间的关系, 证明了理论仿真及分析的正确性。

参 考 文 献

[1] Song F, Liu S J, Niu K Z, *et al.* Principle and

application research on laser cleaning [J]. *Cleaning World*, 2005, 21(1): 1-6.

宋峰, 刘淑静, 牛孔贞, 等. 激光清洗原理与应用研究 [J]. *清洗世界*, 2005, 21(1): 1-6.

[2] Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Status and prospect of laser cleaning procedure [J]. *Laser Technology*, 2000, 24(2): 68-73.

王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 激光清洗工艺的发展现状与展望 [J]. *激光技术*, 2000, 24(2): 68-73.

[3] Schawlow A L. Lasers [J]. *Science*, 1965, 149 (3679): 13-22.

[4] Bo Y, Geng A C, Bi Y, *et al.* High average power Q-switched quasi-continue-wave Nd: YAG laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(3): 1171-1175.

薄勇, 耿爱丛, 毕勇, 等. 高平均功率调 Q 准连续 Nd: YAG 激光器 [J]. *物理学报*, 2006, 55(3): 1171-1175.

[5] Furuta K, Kojima T, Fujikawa S, *et al.* Diode-pumped 1 kW Q-switched Nd: YAG rod laser with high peak power and high beam quality [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(19): 4119-4122.

[6] Kim D, Oh B, Jang D, *et al.* Experimental and theoretical analysis of the laser shock cleaning process for nanoscale particle removal [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(19): 8322-8327.

[7] Qi Y, Ye Y Y, Wang H J, *et al.* Mechanisms of laser cleaning of contamination on surface of stonework [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (6): 0603001.

齐扬, 叶亚云, 王海军, 等. 激光清除石质文物表面污染物的作用机制 [J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0603001.

[8] Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Parameters and mechanisms of laser cleaning rubber layer on a tyre mould [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(11): 1050-1054.

王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 激光清洗轮胎模具表面橡胶层的机理与工艺研究 [J]. *中国激光*, 2000, 27 (11): 1050-1054.

[9] Zheng G, Tan R Q, Zhen Y J, *et al.* Experimental study on TEA CO₂ laser paint stripping [J]. *Laser Journal*, 2005, 26(5): 82-84.

郑光, 谭荣清, 郑义军, 等. TEA CO₂ 激光脱漆实验研究 [J]. *激光杂志*, 2005, 26(5): 82-84.

[10] Shi S D, Du P, Li W, *et al.* Research on paint removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 (9): 0903001.

施曙东, 杜鹏, 李伟, 等. 1064 nm 准连续激光除漆研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0903001.

[11] 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.
- [12] Zhang H, Liu W W, Dong Y Z, *et al.* Experimental and mechanism research on paint removal with low frequency YAG pulsed laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(12): 121401.
章恒, 刘伟嵬, 董亚洲, 等. 低频 YAG 脉冲激光除漆机理和实验研究[J]. *激光与光电子学展*, 2013, 50(12): 121401.
- [13] 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*, 2007, 34(11): 1577-1581.
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, 34(11): 1577-1581.
- [14] Shi S D. Researches on theoretical model, numerical simulation and application of painting removal by laser cleaning [D]. Tianjin: Nankai University, 2012: 55-70.
施曙东. 脉冲激光除漆的理论模型数值计算与应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2012: 55-70.
- [15] Reinhart P. Tailored light 2: laser application technology [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [16] Jiang M Q, Wei Y P, Wilde G, *et al.* Explosive boiling of a metallic glass superheated by nanosecond pulse laser ablation [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(2): 021904.