

# 1064 nm 准连续激光除漆研究

施曙东<sup>1</sup> 杜鹏<sup>1</sup> 李伟<sup>1</sup> 宋峰<sup>1</sup> 王超<sup>2</sup> 陈念江<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南开大学物理科学学院, 天津 300071

<sup>2</sup>华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015

**摘要** 激光清洗作为环保节能的绿色清洗方法,在钢铁材料表面除漆领域具有重要的应用前景。利用波长为 1064 nm,重复频率为 0.5~50 kHz 可调的声光调 Q 准连续 Nd:YAG 激光对钢基底表面漆层样品进行了清洗实验和工作机理研究。模拟和实验结果表明,在钢基底表面漆层脉冲激光去除中,阈值清洗条件下有效清洗机理是振动效应,而有基底损伤时有效清洗机理是振动效应和烧蚀效应;对于厚为 50 μm 漆层的钢铁基底,在平均功率 20 W 以上且搭接率为 80% 时,能够完全清除基板表面油漆而不损伤其基体。在保证激光功率密度和扫描搭接率适当的同时,通过提高激光器输出功率、脉冲重复频率或增加光斑直径,可以获得更好的清洗效果和更高的清洗效率。

**关键词** 激光技术;激光应用;除漆;激光清洗;准连续 Nd:YAG 激光

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0903001

## Research on Paint Removal with 1064 nm Quasi-Continuous-Wave Laser

Shi Shudong<sup>1</sup> Du Peng<sup>1</sup> Li Wei<sup>1</sup> Song Feng<sup>1</sup> Wang Chao<sup>2</sup> Chen Nianjiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Solid-State Laser, North China Institute of Optics and Electronics, Beijing 100015, China

**Abstract** As an environment-friendly low energy-consumptional green cleaning method, laser cleaning has important applications in paint removal. The removal of paint from steel substrate with a 1064 nm acoustic optical Q-switched quasi-continuous-wave Nd:YAG laser is reported. The influences of laser peak power density on the cleaning result and substrate damage are investigated by numerical simulations and experiments. And the effect of the overlap ratio of laser spots on the cleaning result is investigated. The results show that, during the process of steel substrate paint stripping, the effective mechanism is vibration effect under the condition of threshold cleaning, and it is the combination of vibration effect and ablation effect under the condition of damage cleaning. For the paint with a thickness of 50 μm on the steel substrate, average power of 20 W and more than 80% overlap ratio of laser spot are effective to remove the paint while keeping the substrate undamaged. With the increase of laser power, repetition rate and the radius of laser spot, the cleaning efficiency increases and the cleaning becomes more effective.

**Key words** laser technique; laser application; paint removal; laser cleaning; quasi-continuous-wave Nd:YAG laser

**OCIS codes** 140.3330; 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

激光清洗是近年来新兴的清洗技术,具有低损伤、零排放、无污染等优点<sup>[1,2]</sup>,在微电子元件<sup>[3,4]</sup>、文物和艺术品<sup>[5,6]</sup>、模具<sup>[7]</sup>和光学镜面清洗<sup>[8]</sup>等方面都取得了很好的效果。随着激光技术的发展,激光器的性能不断提升,已具备将激光清洗技术应用在

大面积工业清洗领域的条件。漆层涂装是工业中保护钢铁材料的重要手段,例如船舶、桥梁等大型钢铁设备都需要定期重新涂装,其中除漆是再涂装之前最为重要的工序,通常的除漆周期为 2~3 年<sup>[9]</sup>。而这种除漆方式表现在作用表面为大面积双层结合。目前已经进行了用激光去除飞机和船舶表面漆层的

收稿日期: 2012-02-24; 收到修改稿日期: 2012-05-25

基金项目: 国防基础科研计划(A1120110023)资助课题。

作者简介: 施曙东(1973—),男,博士研究生,主要从事半导体、光电子技术等方面的研究。E-mail: stonlek@gmail.com

导师简介: 宋峰(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事激光技术及其应用、发光材料、表面等离子体增强发光等方面的研究。E-mail: fsong@nankai.edu.cn

研究<sup>[10,11]</sup>,但尚没有对于清洗机理作用的条件的具体分析。Watkins 等<sup>[12]</sup>研究认为激光清洗中主要起清洗作用的是烧蚀、快速热作用的振动等六种机理。Michel 等<sup>[13]</sup>研究认为激光清洗中作用机理与激光吸收相关,对于透明介质热机械作用是主要机理,吸收介质中烧蚀机理是主要作用机理,但对于除漆过程中的机理并没有明确界定。吴丽雄等<sup>[14]</sup>进行了聚氨酯黑漆的红外连续激光损伤机理的研究,但分析对象仅限于漆层,对于能量较高的脉冲激光作用以及基底损伤机理和漆层完全去除没有做相应研究。刘春阳等<sup>[15]</sup>对纳秒脉冲激光在材料表面形成的微结构进行了检测,但对于脉冲激光造成的微结构损伤没有进行成因分析。于振坤等<sup>[16]</sup>对脉冲激光形成的区域破坏进行了模型研究,其中考虑了材料的热扩散长度,但未研究多层材料的情形。

本文研究了准连续激光清洗漆层过程中的主要作用机理,以及激光峰值功率密度、扫描搭接率等关键因素对钢铁基底材料除漆效果的影响。针对工业除漆激光清洗,选择声光调 Q 准连续 Nd:YAG 激光器作为清洗光源进行激光除漆研究。其中激光器的脉冲重复频率从百赫兹到几十千赫兹,可实现千瓦级脉冲输出,同时可以用光纤传输,操作方便,便于使用。研究得出的作用机理以及关于激光峰值功率密度和扫描搭接率对清洗效果和清洗效率影响的结论,结合测出的数据,对于实验和工业应用有一定的参考价值。

## 2 激光除漆原理

激光除漆实际上就是利用激光与漆层和基底的相互作用克服漆层与金属基底的粘附力或直接将漆层气化实现去除的过程。激光除漆主要作用机理包括振动效应和烧蚀效应<sup>[17]</sup>,其中振动效应是指当激光照射时,漆层和基底分别吸收部分激光能量使漆层和基底的温度升高并在激光脉冲结束时降温,短时间内迅速的热膨胀和冷却收缩会导致漆层和基底的结合处产生应力振动来克服粘附力,使漆层脱离基底的现象;烧蚀效应是指当漆层吸收的激光能量较多时,漆层的温度升高超过气化温度后,漆层会被气化去除的现象。

这两种效应的物理实质是激光对于材料的热作用以及随之产生的热应力,作用模型如图 1 所示。模型坐标系以  $z = 0$  处的平面为漆覆层与金属基底的接触面,表层漆覆层的厚度为  $L_p$ ,基底的厚度为  $L_s$ ,基底的厚度  $L_s$  远远大于激光的基底

吸收长度  $1/\alpha$ ,整个系统的  $r$  方向边界为  $r = R$ 。

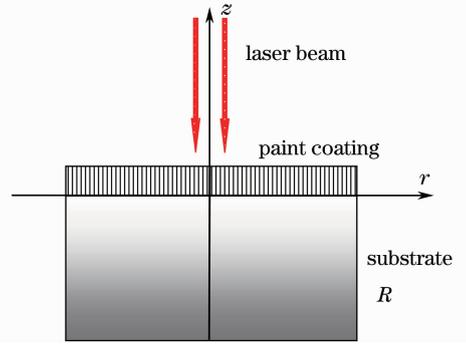


图 1 漆层-基底结构坐标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of painting-substrate and coordinate system

干式激光除漆中采用调 Q 脉冲激光。由于脉冲激光的功率密度与时间和空间变化有关,因此,当入射的激光束脉冲的能量密度为  $I_0$  时,高斯分布脉冲激光的表达式为

$$I(r, t) = I_0 s(r) g(t) = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \frac{t}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

式中  $I_0$  为入射激光初始光强,  $s(r)$  和  $g(t)$  分别为高斯激光的空间和时间分布形式,  $\tau$  为脉冲激光函数的半峰全宽。在漆覆层激光清洗中,入射激光脉冲作为热源,其能量由漆覆层和基底各吸收一部分。根据物质对光的吸收定律可知,各层中吸收的光强为

$$-k_m \frac{\partial}{\partial z} T_m(r, z, t) = A_m(T) I_0 s(r) g(t) \exp(-\alpha z), \quad (2)$$

式中  $k_m$  为各层材料的热导系数,  $A_m(T)$  为各层材料的吸收率,角标  $m$  分别为基底和漆层参数,  $\alpha$  为材料的吸收系数。

吸收激光后,首先会引起热效应,其作用过程可视为热传导作用过程。热传导方程式可表示为

$$\rho_p c_p \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r k_p \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_p \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right], \quad (3)$$

式中  $z$  取值范围为  $0 \sim L_p$ 。

激光照射可以作为表面热源,因此漆覆层上表面的边界条件为

$$-k_p \frac{\partial}{\partial z} T_p(r, L_p, t) = A_p(T) I_0 s(r) g(t) \exp(-\alpha L_p). \quad (4)$$

在初始状态时,即  $t = 0$  时,漆覆层与环境温度相同,即

$$T_p(r, z, 0) = T_0, \quad (5)$$

式中  $T_0$  为环境温度, 设  $T_0 = 293$  K。因此, 经过漆层后, 激光脉冲的功率密度为

$$I(r, 0, t) = (1 - R)I(r, z, t)A_p(T)I_0s(r)g(t)\exp(-\alpha L_p), \quad (6)$$

式中  $R$  为材料表面对激光的反射率,  $A_p$  为漆覆层的激光吸收率。

同理可以确定基底温度分布方程, 需要注意的是入射到基底的激光功率密度并非初始功率密度, 而是被表面漆层反射和吸收后透射的激光功率密度。

基底层中热传导方程为

$$\rho_s c_s \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r k_s \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_s \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right], \quad (7)$$

式中  $p_s, c_s, k_s$  分别代表基底的密度、热容和热传导系数;  $T$  为  $t$  时间内的温度分布。透射激光照射同样可作为表面热源, 因此基底上表面 ( $z = 0$ ) 的边界条件可以表示为

$$-k_s \frac{\partial}{\partial z} T_s(r, 0, t) = A_s(T)I(r, 0, t)s(r)g(t), \quad (8)$$

在脉冲激光作用于层结构时, 由于激光作用的面积与模型结构的面积相比很小, 而在激光脉冲持续时间内, 热传导范围仅仅局限于层结构和基底的浅表面, 因此模型的两个  $R$  边界侧面和基底背面对于热传导而言是绝热的。

在模型中可以认为系统两个侧壁是绝热的, 即侧壁的法向没有热交换, 得出系统的侧壁有相同的边界条件

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{x=\pm R} = 0. \quad (9)$$

漆覆层和基底的分界面 ( $z=0$ ) 可视为理想热接触界面, 因此两者的温度相同, 即

$$T_s(r, 0, t) = T_p(r, 0, t), \quad (10)$$

基底与激光入射方向相反的背面可以假设为绝热条件, 因此基底背面的边界条件可表示为

$$T_s(x, -L_s, t) = T_0, \quad (11)$$

式中  $L_s$  为基底的厚度。当  $t=0$  时, 初始条件为

$$T(x, z, 0) = 0. \quad (12)$$

### 3 实验装置

激光除漆实验系统包括激光器系统、光束调整

传输系统、工作台、控制系统以及测试仪器和辅助设备, 如图 2 所示。

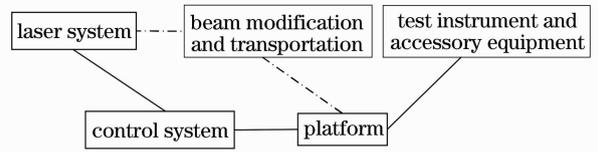


图 2 实验系统结构组成图

Fig. 2 Structure of experimental setup

采用连续氩灯抽运的声光调 Q 激光器作为清洗光源。激光电源最大电流为 22 A, 实验中电流工作范围为 13~20 A。声光调 Q 开关模块的射频输出频率为 27 MHz, 射频功率为 50 W, 重复频率工作在 0.5~50 kHz。

光束调整传输系统用于将激光器输出的激光传递到实验样品, 并改善激光输出特性。激光器输出的光束是由多个未聚焦的点脉冲组成的, 首先通过光束调整系统扩束对光束进行准直, 然后通过单轴光学扫描振镜做往复摆动扫描, 使点状光斑扫描成长度约为 25 mm 的准线状光斑, 最后使用焦距为 160 mm 的场镜进行平场聚焦, 使激光光斑直径为 0.6 mm 左右, 如图 3 所示。

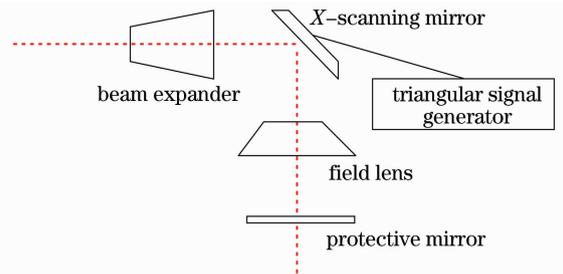


图 3 光束调整传输系统

Fig. 3 Beam modification and transportation system

实验使用的工作台为电控一维高精度平移台, 可实现匀速平移, 精确度达到毫米每秒量级, 用以控制清洗速度。控制系统用于协调脉冲激光重复频率与步进电机转速。

实验使用的测试仪器有 4XCE 型金相显微镜和 148 型 1064 nm 激光功率计。

## 4 结果与讨论

### 4.1 激光峰值功率密度对除漆效果的影响

实验中采用的样品为钢质基底, 涂覆红色醇酸漆, 漆层厚度为 50  $\mu\text{m}$ 。设定激光脉冲重复频率为 3 kHz, 光斑直径约为 0.6 mm, 平均脉冲宽度为 300 ns, 扫描速度约为 0.55 mm/s。实验前, 首先用激光功率计测试并记录激光器在不同重复频率下和

不同抽运电流情况下的输出功率,用以计算激光峰值功率密度。随着激光峰值功率密度的不断增大,样品表面的漆层逐渐脱落。为有效确定清洗阈值和损伤阈值,定义当样品表面漆层刚开始与基底分离并有脱落的趋势时的功率密度为清洗阈值,当漆层已经完全脱离金属表面而金属表面没有明显损伤凹痕时为完全清洗,当金属表面有较为明显的网纹状损伤凹痕时确定为达到损伤阈值。表 1 所示为激光峰值功率密度对清洗效果的影响。

表 1 激光峰值功率密度对清洗效果的影响

Table 1 Cleaning effects with different laser peak power densities

Average power / W	Laser peak power density / ( $10^6 \text{ W/cm}^2$ )	Experimental results
13.5	5.31	Paint layer is separated but not removed
18.9	7.43	Paint layer is partly removed
24.6	9.67	Paint layer is cracked and fragments are ejected. Metal substrate is damaged unobviously
29.6	11.64	Paint layer is removed fully. Metal substrate is damaged obviously
35.6	14.0	Damage of metal substrate is increased
40.0	15.73	Metal substrate is damaged obviously. Reticulate concaves appear

激光平均功率小于 13.5 W 时,漆层表面颜色变浅,但并未与金属基体分离。当激光平均功率达到 13.5 W 时,扫描区域的漆层开始起皮分离,人工剥离漆层时可发现金属基体很光滑,如图 4(a)所

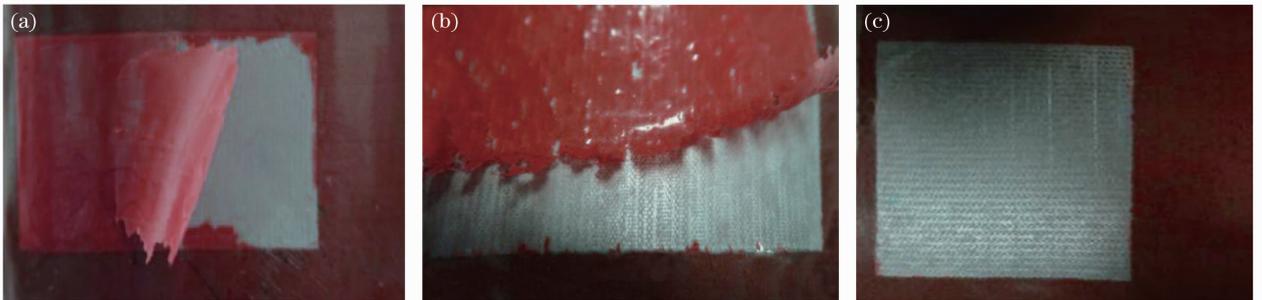


图 4 不同平均功率下的清洗现象。(a) 13.5 W;(b) 18.9 W;(c) 24.6 W

Fig. 4 Cleaning effects with different average laser powers. (a) 13.5 W; (b) 18.9 W; (c) 24.6 W

由于数值计算软件 Comsol Multiphysics 对于瞬态作用的热-结构应力作用过程有较好的优化方案,因此在激光清洗的理论计算中使用该有限元 (FE) 工具。根据前述的热传导过程和实验数据计算确定在激光脉冲作用下在漆层-基底系统中产生的温度、应力分布情况,结果如图 6 所示。实验结果

示。此时达到清洗阈值,相应的峰值功率密度  $F$  为

$$F = \frac{4P}{f \cdot \pi D^2 \cdot \tau} = \frac{4 \times 13.5}{3000 \times 3.14 \times (0.6 \times 10^{-1})^2 \times 300 \times 10^{-9}} = 5.31 \times 10^6 \text{ (W/cm}^2\text{)},$$

式中  $f$  为重复频率,  $D$  为光斑直径,  $P$  为该重复频率下激光平均功率。

当激光平均功率增加至 18.9 W 时,扫描区域漆层开始脱落,有部分漆层开始脱离基底,漆层脱落处金属基底表面出现程度较浅的网格状条纹,即已经发生基底损伤,如图 4(b)所示。

当激光平均功率增加至 24.6 W 时,漆层开始完全崩碎并喷射飞离金属基体,金属基体开始出现明显的网纹,但没有较为明显的损伤。当功率继续加大时,漆层金属基体的网纹更加明显和粗糙,金属基体开始出现大的凹坑,如图 4(c)所示。可认为这时已经达到除漆的损伤阈值,相应的激光峰值功率密度为  $11.64 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。

图 5 为金相显微镜放大后的基底图,显示了不同激光功率密度清洗后金属表面的微观形貌。图 5(a)是在激光峰值功率密度为  $5.31 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$  时清洗后的照片,可以发现清洗效果很好,金属表面未见损伤;图 5(b)是在激光峰值功率密度为  $7.43 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$  时清洗后的照片,金属表面漆层完全清除,但基底表面略有损伤;图 5(c)为激光峰值功率密度为  $11.64 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$  时的形貌,漆层虽完全清除,但金属表面损伤已经比较明显。

表明,在清洗阈值条件下,在漆层表面基本没有烧蚀痕迹,结合计算结果可知,在该条件下,漆层中温度低于熔点和气化温度,温度的最大值发生在基底的浅表面,而迅速变化的温度产生的热应力是漆层分离的脱离力来源。因此可确定,阈值清洗条件下,漆层移除的主要机理是热振动效应。在激光峰值功率

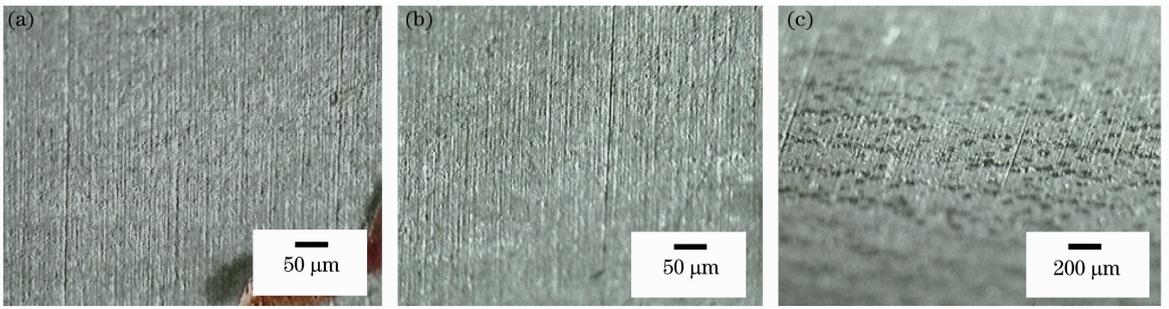


图5 在不同激光峰值功率密度下清洗后样品微观表面情况。(a)  $5.31 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ ; (b)  $7.43 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ ;  
(c)  $11.64 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$

Fig. 5 Micro-structure of sample surfaces after laser irradiation with different peak power densities.

(a)  $5.31 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ ; (b)  $7.43 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ ; (c)  $11.64 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$

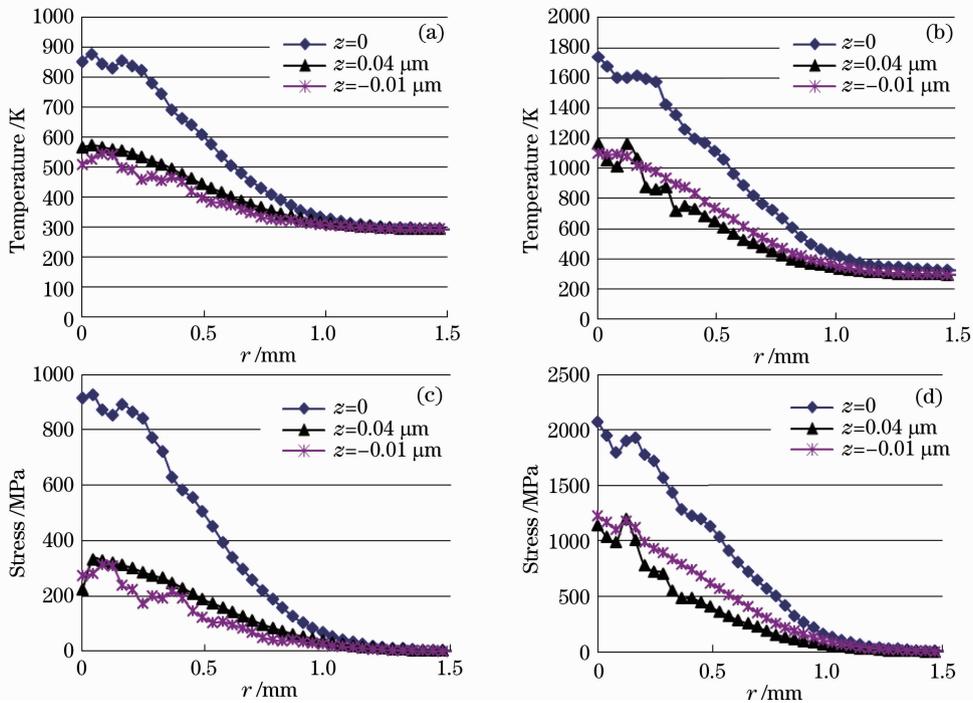


图6 (a)清洗阈值条件下的温度分布;(b)基底损伤条件下的温度分布;(c)清洗阈值条件下的应力分布;  
(d)基底损伤条件下的应力分布

Fig. 6 (a) Temperature distribution under the cleaning threshold condition; (b) temperature distribution under the substrate damage condition; (c) stress distribution under the cleaning threshold condition; (d) stress distribution under the substrate damage condition

远高于清洗阈值时,属于损伤清洗条件,实验结果表明在基底中产生了明显的损伤。结合计算结果可以看出,此时,激光光斑中心的基底温度已经接近或超过实验中钢材的熔点 1600 K,因此在基底中产生了熔坑状的损伤。而且此时在漆层中的温度也已经超过漆材料的熔点 650 K。因此可确定在损伤清洗条件下,漆层移除的机理既包括振动效应,也包括烧蚀效应。

#### 4.2 扫描搭接率对除漆效果的影响

脉冲激光器发出的激光扫描线是由一系列非连

续的点脉冲组成的,依靠光束调整系统中扫描振镜的往复摆动形成一条近连续的扫描线。对于所用的准连续激光,光斑为圆形,激光模式为准高斯型,即光束中心能量分布比较均匀,但光束边缘能量较低,光斑边缘的油漆难以完全清除,因此每个光斑间需要有一定的搭接率才能实现漆层的完全清洗。同时,在扫描线移动的过程中,各扫描线之间也存在搭接率是否合适的问题。在阈值清洗条件下,扫描搭接率实质上取决于光斑形状、面积、重复频率和扫描速度等的综合作用。因此,在研究中通过考察激光

扫描线的平移速度,最终得到一个合适的扫描线搭接率,以此来指导扫描线内的搭接率。

图 7 所示为激光光斑之间搭接示意图,设照射点半径为  $r$ ,每个点的搭接长度为  $l$ ,激光脉冲点形成的扫描线总长为  $L$ 。扫描线长度  $L$ 、点脉冲半径  $r$  和搭接量  $l$  的关系为

$$L = 2nr - (n - 1)l.$$

定义搭接率为  $l/2r$ 。当  $l=2r$  时,各个点脉冲完全重合,此时搭接率为 100%;当  $l=0$  时则各个扫描线之间处于刚好能够接触且完全没有搭接的情况,此时搭接率为 0。

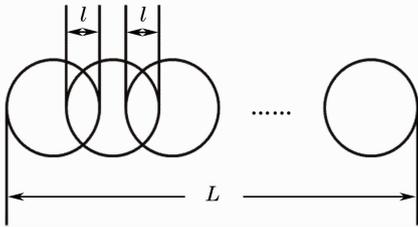


图 7 激光光斑之间搭接示意图

Fig. 7 Overlap of adjacent laser spots

激光重复频率为 3 kHz,在 1 s 的照射时间内,激光器输出了 3000 个点脉冲。振镜周期为 25 ms,扫描线宽度 25 mm,那么振镜摆动周期内形成的一条扫描线上能够分布  $25.2 \times 3000 / 1000 = 75.6$  个点脉冲,即 1 s 形成了  $3000 / 75.6 = 39.6$  排扫描线。从扫描线的移动方向看,当扫描速度为 1.88 cm/s 时,搭接率约为 62%;当扫描速度为 1.39 cm/s 时,则搭接率约为 73%;当扫描速度为 0.76 cm/s 时,搭接率约为 86%。实验中仍然对钢质基底、涂覆红色醇酸漆、漆层厚度为 50  $\mu\text{m}$  的样品进行清洗,设定激光器功率为能够完全清洗的数值,根据以上实验数据选择平均功率为 24.6 W,光斑直径设定为 0.6 mm,光斑面积约为 0.28  $\text{mm}^2$ ,此时激光峰值功率密度为  $9.67 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。通过调节工作台的平移速度,可以改变搭接率。

当扫描速度为 1.88 cm/s 时,激光扫描过的区域中点脉冲作用到的漆层已经能够完全除去,但由于扫描线移动速度过快,各扫描线之间搭接率较低,造成沿扫描方向残漆条纹比较明显;当扫描速度降为 1.39 cm/s 时,扫描线之间的残漆条纹已经不明显了;当扫描速度降为 0.76 cm/s 时,漆层完全除去,且金属没有明显损伤。即只有激光点之间的搭接率大于 80% 时,才会取得较为理想的除漆效果,当激光点之间的搭接率小于该值时,将会出现较明显的残漆条纹现象,如表 2 所示。

表 2 激光扫描速度对除漆效果的影响

Table 2 Effect of paint removal at different scanning speeds

Scanning speed / (cm/s)	Overlap ratio / %	Experimental results
1.88	62	Stripe of residual paint is obvious
1.39	73	Paint layer is removed basically
0.76	86	Paint layer is removed fully, damage of substrate is unobvious

## 5 结 论

研究了 1064 nm 准连续激光钢基底表面除漆及激光峰值功率密度和激光扫描搭接率对激光清洗的影响。实验中样品清洗阈值为  $5.31 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ ,适当地增加峰值功率密度可提高清洗效率,但是实验和计算显示当激光峰值功率密度过高时会对基底造成损伤。此外,发现在达到清洗阈值但功率密度增加不大的情况下,清洗机理主要为振动效应,而激光峰值功率密度较高时,清洗机理是振动效应和烧蚀效应同时起作用。因此,需要针对不同厚度漆层的样品适应性地调整激光峰值功率密度。激光扫描搭接率对除漆效果有非常重要的影响,可以根据不同的激光参数分别对脉冲重复频率、聚焦后的光斑直径和扫描速度进行调节来实现。对于钢质基底,厚度为 50  $\mu\text{m}$  的醇酸漆,当搭接率为 80% 以上时,能完全清除漆板表面的油漆而不损伤基体,获得高的清洗效率和好的清洗效果。在研究过程中,使用功率为 50 W 的声光调 Q Nd:YAG 激光器进行清洗实验研究。对于清洗阈值已确定的样品,可以在保证激光功率密度和扫描搭接率合适的同时选用更大输出功率的激光器进行清洗,高功率激光器相比于低功率激光器可以提供更大面积的光斑和更大的扫描速度,因此可提高脉冲重复频率和增加光斑直径以获得更高的清洗效率和较高的清洗效果。

## 参 考 文 献

- 1 G. Daurelio, G. Chita, M. Cinquepalmi. Laser surface cleaning, de-rusting, de-painting and de-oxidizing [J]. *Appl. Phys. A*, 1999, **69**(suppl.): S543~S546
- 2 D. Bauerle. Laser processing and chemistry; recent developments [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2002, **186**(1-4): 1~6
- 3 Y. W. Zheng, B. S. Luk'yanchuk, Y. F. Lu et al.. Dry laser cleaning of particles from solid substrates: experiments and theory [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **90**(5): 2135~2142
- 4 N. Arnold. Dry Laser Cleaning of Particles by Nanosecond Pulses: Theory, in B. S. Luk'yanchuk (Ed.), *Laser Cleaning* [M]. New Jersey: World Scientific, 2002. 51~102
- 5 H. Garbacz, E. Fortuna, J. Marczak et al.. Laser cleaning of copper roofing sheets subjected to long-lasting environmental

- corrosion[J]. *Appl. Phys. A*, 2010, **100**(3): 693~701
- 6 S. Siano, R. Salimbeni. Advances in laser cleaning of artwork and objects of historical interest: the optimized pulse duration approach[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2010, **43**(6): 739~750
- 7 Wang Zemin, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. Parameters and mechanisms of laser cleaning rubber layer on a tyre mould[J]. *Chinese J. 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
- 8 K. Mann. Cleaning of optical surfaces by excimer laser radiation [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1996, **96-98**: 483~488
- 9 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  
陈菊芳, 张永康, 许仁军等. 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光脱漆的实验研究 [J]. *激光技术*, 2008, **32**(1): 64~70
- 10 Luo Hongxin, Cheng Zhaogu. High power CW laser using in aircraft laser paint removing[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(6): 52~53  
罗红心, 程兆谷. 大功率连续 CO<sub>2</sub> 激光器用于飞机激光去漆 [J]. *激光杂志*, 2002, **23**(6): 52~53
- 11 G. X. Chen, T. J. Kwee, K. P. Tan. Laser cleaning of steel for paint removal[J]. *Appl. Phys. A*, 2010, **101**(2): 249~253
- 12 K. G. Watkins. Mechanisms of laser cleaning[C]. *SPIE*, 2000, **3888**: 165~174
- 13 A. Michel, O. Roland. Basic processes of pulsed laser materials interaction. Applications to laser cleaning of oxidized surfaces [C]. *SPIE*, 2005, **5777**: 982~985
- 14 Wu Lixiong, Ye Xisheng, Liu Zejin. Investigation on infrared continuous-wave laser damage mechanism of polyurethane-based black paint[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302002  
吴丽雄, 叶锡生, 刘泽金. 聚氨酯黑漆的红外激光损伤机理研究 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302002
- 15 Liu Chunyang, Sun Lidong, Fu Xing *et al.*. Si microstructure fabricated by 355 nm nanosecond pulsed laser and its fluorescence microscopy study [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2139~2142  
刘春阳, 孙立东, 傅星等. 355 nm 纳秒脉冲激光在硅表面照射形成微结构及其荧光检测 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2139~2142
- 16 Yu Zhenkun, Qi Hongji, Zhao Yuan'an *et al.*. A model of region defects under nanosecond pulsed laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1214001  
于振坤, 齐红基, 赵元安等. 纳秒脉冲激光诱导的区域缺陷破坏模型 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1214001
- 17 Tian Bin, Zou Wanfang, He Zhen *et al.*. Paint removal experiment with pulsed Nd:YAG laser[J]. *Cleaning World*, 2007, **23**(10): 2~5  
田彬, 邹万芳, 何真等. 脉冲 Nd:YAG 激光除漆实验 [J]. *清洗世界*, 2007, **23**(10): 2~5

栏目编辑: 宋梅梅