

低频 YAG 脉冲激光除漆机理和实验研究

章 恒¹ 刘伟崑^{1*} 董亚洲¹ 陈俊超¹ 张洪潮^{1,2}

(¹ 大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024
² 德克萨斯理工大学工业工程系, 美国德克萨斯州, 卢伯克 79409)

摘要 激光清洗在再制造行业、微机电系统(MEMS)和超精密加工行业具有重要的应用前景。采用低频 YAG 脉冲激光器对 FV520B 基体的表面漆层进行激光除漆实验和机理研究。实验结果表明,激光除漆机制因实验条件的改变而不同。当吹氩气时,激光除漆机制主要是烧蚀效应;当采用约束层水时,激光除漆机制主要是烧蚀效应和振动效应,而且约束层水不但能提高表面漆层的去除率还能极大地提高基体的临界损伤阈值。同时实验验证了理论计算得到的搭接率的除漆效果,即在激光扫描速度为 249 mm/min、扫描道间的搭接量为 0.6 mm 时,实现了整个漆层的完全去除,激光除漆效率达 15.5 mm²/s。

关键词 激光技术;激光应用;除漆;激光清洗;YAG 脉冲激光

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.121401

Experimental and Mechanism Research on Paint Removal with Low Frequency YAG Pulsed Laser

Zhang Heng¹ Liu Weiwei¹ Dong Yazhou¹ Chen Junchao¹ Zhang Hongchao^{1,2}

(¹ School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)
² School of Industrial Engineering, Texas Tech University, Lubbock, TX 79409, USA)

Abstract Laser cleaning technology, which is environment-friendly, has a wide range of application prospects in remanufacturing, micro-electro-mechanical system (MEMS) and ultra-precision machining. The mechanism and experimental research of removing paint layer from FV520B substrate with low frequency pulsed YAG laser is carried out. The experimental results show that, the removal mechanism differs under different experimental conditions, which is mainly ablation effect when blowing argon but transfers into vibration effect and ablation effect when water as a transparency overlay is used. The overlay water can not only increase the removal rate but also enlarge the damage threshold of laser. The removing effect of overlapping ratio is also calculated, that is, with the laser scanning speed of 249 mm/min and the overlap value between two traces of 0.6 mm, the whole paint layer can be removed completely with the removal rate of 15.5 mm²/s.

Key words laser technique; laser application; paint removal; laser cleaning; YAG pulsed laser

OCIS codes 140.3330; 140.3390; 160.3900

1 引言

随着再制造技术、微机电系统(MEMS)技术以及超精密加工技术的快速发展,对再制造件、硅片以及工件的洁净程度要求越来越高。传统的机械式擦洗技术、化学清洗技术、电化学清洗技术、超声波清洗技术已不能满足工业生产的要求。同时,人们的环保意识不断增强,各国研究者们都在积极地开发节能、环保、清洗

收稿日期: 2013-07-01; 收到修改稿日期: 2013-07-23; 网络出版日期: 2013-11-04

基金项目: 国家 973 计划(2011CB013402)、国家自然科学基金(51305063)、中央高校基本科研业务费专项[DUT11RC(3)80]

作者简介: 章 恒(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光加工和清洗、电子束加工和清洗等方面的研究。

E-mail: zhangheng031199@163.com

导师简介: 张洪潮(1953—),男,博士,教授,主要从事机械装备的再制造技术、面向再制造的绿色环保清洗技术、面向全寿命周期的产品节能设计等方面的研究。E-mail: hongchao18@163.com

* 通信联系人。E-mail: ghostliuww@163.com

效率高的新型清洗技术。在这种情况下,由于激光清洗技术具有低损伤、零排放和无污染等优点,受到了各国学者的广泛关注^[1-4]。现在,在 MEMS 制造^[5-6]、珍贵文物和艺术品的保护^[7-9]、模具^[10]和超精密光学清洗^[11-12]方面得到了广泛的应用。

近年来,随着光学技术的快速发展和激光器性能的不提高,使得应用激光除去大面积漆层成为可能。漆层涂装是保护大型装备、钢架、桥梁、汽车、船舶、飞机、航天器等钢制产品的重要手段。在服役的过程中,由于机械刮擦和服役环境的不同,会出现漆层氧化脱落等现象。这就要求我们必须根据不同的服役环境来定期地重新涂装,其中除漆是重新涂装前的最重要的一道工序,基体的清洁度严重影响新漆层的质量,甚至会严重地影响钢制产品的服役寿命^[3]。因此,各国的学者都对激光除漆进行了深入的研究。早在 20 世纪 80 年代,美国的 Woodroffe^[13]用 CO₂ 激光器在工作在单脉冲能量 1 kJ,脉宽 20 ns,重复频率 10 Hz 的条件下为飞机脱漆,并取得了极佳的除漆效果。德国的 Schweizer 等^[14]在 1995 年为激光除漆研制了功率为 2 kW 的激光器,成功地应用于国防工业。日本的 Tsunemi 等^[15]用 500 W 横向激励大气压(TEA)CO₂ 激光器在单脉冲能量为 500 mJ,重复频率为 1 kHz 的参数下,将光束聚焦成 20 cm×300 μm 的线状分布,对 25 μm 厚的漆层进行除漆,除漆速度达 17 m²/h。江苏大学的陈菊芳等^[16]采用波长为 10.6 μm 的轴快流 CO₂ 激光去除铝板表面的油漆层,研究了激光功率密度、扫描速度及扫描道间搭接量与油漆去除效果之间的关系。郑光等^[17]实验研究了激光能量密度对脱漆效率的影响,给出了 TEA CO₂ 激光对基底为 LY12 的样品进行激光脱漆的实验数据。南开大学的施曙东等^[3]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 激光器对钢基底表面漆层样品进行了清洗实验和工作机理研究。但上述研究大都采用连续或高频率的准连续激光器进行除漆试验,由于除漆过程中散热时间短、热量大量沉积,对基体的热损伤严重,降低了装备的服役寿命。同时,大多研究者都采用直接照射的方式进行除漆,对除漆效果都停留在定性的经验描述上,而且有关激光清洗的约束层的研究鲜有报道。

FV520B 是一种高强度不锈钢材料,主要应用于齿轮、轴、轮盘、叶片、转子和泵件。采用传统的除漆方法对这些部件进行除漆时,会在其表面产生划痕并可能成为初始裂纹源,极大地减低了零件的疲劳寿命;同时,消耗了大量的水资源和化学药品,产生的废水和废液严重地威胁着人们的生活环境,极大地增加再制造的成本和能耗。所以,本文将采用一种绿色、节能、环保的激光清洗技术,即低频脉冲激光器来清除 FV520B 材料表面漆层。研究了其过程中激光与漆层以及基体材料的作用机理,以及激光能量密度、光斑间搭接率和约束层对除漆效果的影响,提出了定量表征除漆效果的去除率和去除效率的两个指标。

2 激光与漆层和基体的作用过程

激光除漆实质上是激光与漆层以及基体之间相互作用克服基体与漆层间的粘附力或漆层直接吸收激光能量气化而脱离基体表面的过程。低频长脉宽脉冲激光除漆的机理主要是烧蚀效应和振动效应。

烧蚀效应在激光除漆过程中的作用机制如图 1 所示。其中,图 1(a)是激光束直接照射在漆层表面上;图 1(b)是漆层吸收激光能量后气化并产生冲击力使部分漆层碎片飞离基体表面;图 1(c)是下一个脉冲激光辐射前的形貌。所以脉冲激光多次辐射漆层表面可以实现漆层的完全清除。

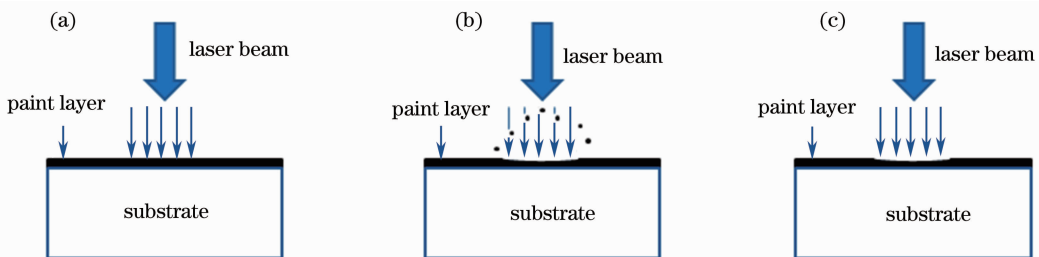


图 1 烧蚀效应的作用过程示意图。(a)激光辐射过程;(b)激光与漆层的作用过程;(c)激光辐射后漆层形貌

Fig. 1 Sketch of working process of ablation effect. (a) Process of laser irradiation; (b) process between laser and paint layer; (c) morphology of paint layer after laser irradiation

振动效应在脉冲激光除漆过程中的作用机制是漆层和基体材料的热膨胀系数不同,在脉冲激光作用后,结合面处会产生热应力引起剧烈的振动,使漆层瞬间从基体表面剥落。同时,激光的粒子性决定了在激光和漆层的作用过程中必然存在着粒子间动量和能量的传递过程,使漆层表面受到很大的冲击力,产生局部碎裂并快速飞离基体表面。

3 实验方法和装置

实验试样的基体材料是 FV520B 高强度不锈钢,用快速喷涂技术在试样表面喷涂一层 $50\ \mu\text{m}$ 厚的黑色漆层作为试样。因为黑漆对激光能量的吸收率可达 97% 以上,所以在单次脉冲激光作用过程可以忽略激光能量的发射现象。喷涂前需要对基材进行打磨、抛光获得镜面效果,再依次用丙酮、无水乙醇和水清洗,以便去除其表面的污染物,从而保证漆层与基体表面有较强的粘附作用力。

实验中的整个脉冲激光除漆系统包含激光器、光斑调节装置、喷嘴、积尘器、二维(2D)工作台和计算机,如图 2 所示。其中,图 2(a)表示在除漆的过程中,氩气作为辅助气体,这样既能将烧蚀后的漆层吹向积尘器,保护激光发射口的清洁,又能带走部分热量,减弱热效应对基体的热损伤,抑制基体的氧化;图 2(b)是清水以一定的流速流入水槽中,并保持水面一直覆盖着试样表面,这样既能提高激光的振动效应,提高除漆效果,又能带走部分漆层碎片。两个装置在侧面都使用了真空吸尘器来收集污染物颗粒,使整个除漆过程绿色环保安全。

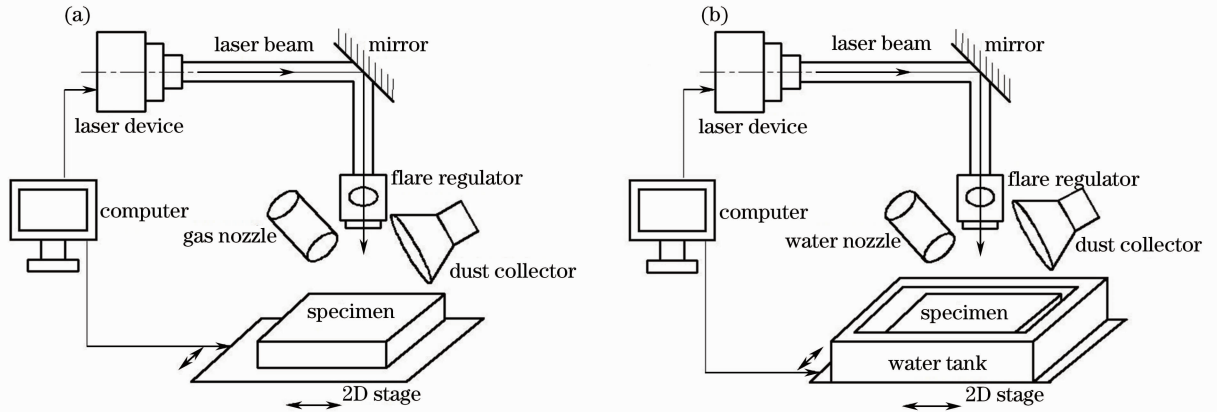


图 2 激光除漆系统示意图。(a)氩气作为辅助气体;(b)水作为约束层的辅助液体

Fig. 2 Sketch of laser paint removal system. (a) Argon as auxiliary gas; (b) water as auxiliary liquid working as an overlay

实验中采用的是低频 YAG 脉冲激光器,具体的实验参数为:波长 $1.064\ \mu\text{m}$,脉宽 $1.0\ \text{ms}$,频率 $2\ \text{Hz}$,激光发射出口与试样表面的距离 $32\ \text{mm}$,光斑直径 $2.4\ \text{mm}$ 。光斑内激光能量服从高斯分布,故激光束在光斑内的能量密度可以表示为

$$I(x, y, t) = I_0 S(x, y) G(t) = I_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{x_0^2 + y_0^2}\right) \frac{t}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

式中 $S(x, y)$ 和 $G(t)$ 是高斯分布的空间和时间 t 的函数, τ 是脉冲激光函数的半峰全宽(FWHM), I_0 是脉冲激光的初始入射能量密度。实验中,可通过改变激光器的工作电流和工作台的移动速度,来研究激光能量密度、搭接率和约束层水对除漆效果的影响,确定不同参数时激光除漆的作用机理。

4 实验结果与讨论

4.1 激光能量密度对除漆效果的影响

为了能达到完全清除漆层的效果,使激光光斑间的搭接率接近 50%,同时固定激光的扫描速度 $F = 150\ \text{mm/min}$ 。实验过程中,改变脉冲激光束的能量密度,研究在不同实验条件下,激光能量密度对除漆效果的影响。如图 3 所示,随着脉冲激光能量密度的增加,激光作用后的试样表面形貌有所不同。其中,图 3(a)是

由图 2(a)除漆装置系统得到的,图 3(b)是由图 2(b)除漆装置系统得到的。为了定量地表征脉冲激光的除漆效果,假定漆是均匀地涂覆在试样表面的,则通过称重法可以得到单位面积上漆的含量记为 m_0 (mg/mm^2);同样地可以得到每次不同能量密度脉冲激光作用后的去除量 m_i (mg/mm^2),其中 $i=1,2,3,\dots$,则表面漆层去除率 $\eta_i = m_i/m_0$ 。图 4 与图 3 相对应,表示表面漆层去除率 η_i 随激光能量密度的变化趋势。

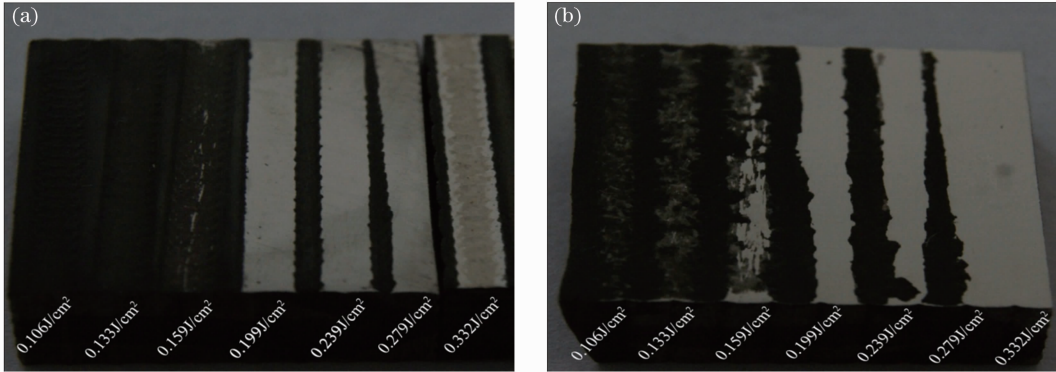


图 3 不同能量密度下试样的表面形貌。(a) 采用吹氩气装置清洗;(b)采用加水装置清洗

Fig. 3 Surface topography of samples at different energy densities. (a) Using the equipment with blowing argon for paint removal; (b) using the equipment with water for paint removal

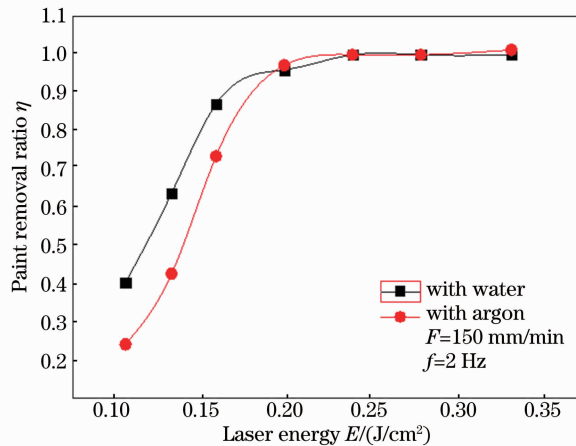


图 4 激光能量密度对去除率的影响

Fig. 4 Influence of laser energy on paint removal ratio

由图 3 和图 4 可知,在其他参数相同的情况下,随着激光能量密度的增大,漆层去除率逐渐增大。其中,由图 3(a)可知,在激光能量密度为 $0.106 \text{ J}/\text{cm}^2$ 时,最表层的漆层被直接去除,次表层表面出现规则的橄榄形烧蚀微坑,而竖直边界十分整齐,这是由于光斑间搭接率太大,光斑上会出现两次重叠的区域,此区域烧蚀次数最多,故形成了明显的橄榄形烧蚀微坑;并且随着激光能量密度的增大,橄榄形烧蚀微坑形成现象越来越不明显,这是由于激光能量密度越大,去除漆层的深度越大;当激光能量密度达到 $0.239 \text{ J}/\text{cm}^2$ 时,漆层已经被完全清除,进一步增大激光能量密度至 $0.332 \text{ J}/\text{cm}^2$ 时,基体表面出现氧化并伴随着烧伤现象。实验过程中能显著地看到烧蚀现象和漆层碎裂现象,因此吹氩气时激光除漆机制主要是烧蚀效应,振动效应十分微弱。由图 3(b)可知,约束层水能显著提升单位能量密度去除漆层量,没有明显的光斑间搭接现象,而且竖直边界不再平整,边缘出现块状脱落现象,这主要是由于水吸收部分能量,双界面层反射了部分能量,减弱了激光烧蚀效应,同时也增强了激光的振动效应,使得在激光作用区域的漆层发生碎裂、在边界附近的漆层发生断裂。当激光能量密度增加到 $0.332 \text{ J}/\text{cm}^2$ 时,基体表面没有出现氧化和烧伤现象,这是由于在整个激光除漆过程中,基体一直被水完全覆盖,有效地避免了与空气接触,同时水也使作用区域迅速冷却,有效地避免激光烧伤现象的发生。在整个实验过程中烧蚀效应明显减弱,但除漆率却得到提高,因此在含约束层水时激光除漆机制主要是振动效应和烧蚀效应。由图 4 可知,在相同的激光能量密度下,含约束层水的除漆装置总体

漆层去除率明显要高于吹氩气的除漆装置。采用吹氩气实验条件时,当激光能量密度增加到 0.332 J/cm^2 时除漆率上升到 1.0125,这是因为此时基体表层材料发生气化现象,漆层的去除质量增大。因此,约束层水的使用可以有效地提高漆层去除率和激光损伤阈值,特别适合用于清洗那些温度敏感性的表面污染物。

4.2 搭接率对除漆效率的影响

实验中低频 YAG 脉冲激光器发出的激光束其光斑是按给定频率分布的一系列不连续圆形光斑,而且在圆形区域内激光能量服从高斯分布。为了实现整个区域中漆层的完全清除,必须要选取合适的搭接率。搭接率一般又包括光斑间搭接率和扫描道间搭接率。光斑间搭接率主要由脉冲激光频率和扫描速度这两个参数决定,而扫描道间的搭接率则相对简单,主要依靠计算机数控(CNC)程序确定。

图 5 是脉冲激光光斑间搭接量、扫描道间搭接量和光斑行走路线示意图,假设光斑直径为 R ,光斑间搭接量为 L_1 ,扫描道间搭接量 L_2 ,则可以方便地定义 $\gamma_1 = L_1/2R$ 和 $\gamma_2 = L_2/2R$ 分别为光斑间搭接率和扫描道间搭接率。

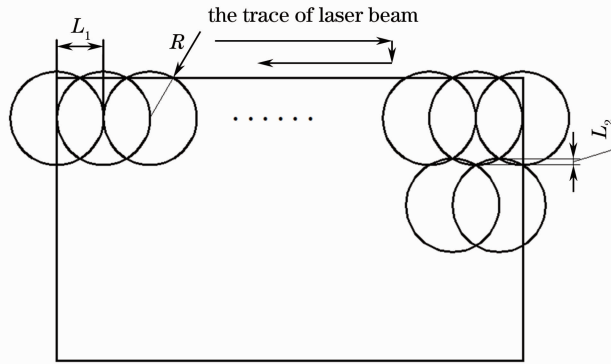


图 5 扫描时激光光斑搭接示意图

Fig. 5 Schematic of laser overlap during the scanning process

为了实现整个试样平面内漆层的完全清除并减小光斑间能量重叠对基体的影响,光斑间搭接量为 L_1 和扫描道间搭接量 L_2 必须要满足一定的关系,如图 6 所示。由图 6 可知:

$$L_1 = 2R(1 - \cos \theta), \quad (2)$$

$$L_2 = R(1 - \sin \theta), \quad (3)$$

$$\gamma_1 = 1 - \cos \theta, \quad (4)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{2}(1 - \sin \theta). \quad (5)$$

由上述分析可知当 $\theta=30^\circ$ 时,三个光斑间的重叠面积最小,激光能量在整个平面内分布比较均匀,散热条件好。此时 $\gamma_1=13.4\%$, $\gamma_2=25\%$ 。

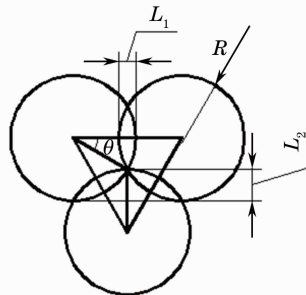


图 6 搭接量间的关系图

Fig. 6 Relationship of overlap of laser

实验中,激光器的频率 $f=2 \text{ Hz}$,激光的光斑直径 $R=1.2 \text{ mm}$,激光扫描速度为 F ,则有

$$L_1 = 2 \left[R - \frac{1}{2} \left(\frac{F}{60f} \right) \right]. \quad (6)$$

联立(2)、(4)、(6)式,并代入已知参数值得

$$\gamma_1 = 1 - \frac{F}{288} \quad (7)$$

所以,由(7)式计算出完全清除整个试样平面漆层的临界参数 $F=249$ mm/min。在实际实验过程中,为了完全清除漆层,同时考虑激光能量重叠状况,一般取 $13.4\% < \gamma_1 \leq 65\%$ 、 $0\% < \gamma_2 \leq 25\%$ 即 100 mm/min $\leq F < 249$ mm/min、 $0 < L_2 \leq 0.6$ mm。

实验时保持激光能量密度为 0.239 J/cm²,激光器的频率 $f=2$ Hz,激光的光斑直径 $R=1.2$ mm 不变,通过改变激光移动速度 F 和扫描道间搭接量 L_2 来获得单位时间内脉冲激光除漆效率 δ ,结果如表 1 所示,其中 S 是去除漆层面积, t 是激光作用时间。

表 1 搭接率对除漆效率的影响

Table 1 Influence of overlapping on paint layer removal efficiency δ

| F /(mm/min) | L_2 /mm | t /s | S /mm ² | δ /(mm ² /s) |
|---------------|-----------|--------|----------------------|--------------------------------|
| 150 | 0.2 | 8 | 92 | 11.5 |
| 200 | 0.4 | 6 | 86 | 14.3 |
| 249 | 0.6 | 4.9 | 76 | 15.5 |

由表 1 可知,光斑间的搭接率越小即激光扫描速度越大,则扫描道间的搭接率越大,这样才能实现整个平面的完全除漆。激光扫描速度越小,光斑间搭接率越大,激光能量重叠也越严重,容易对基体产生严重的损伤,单道除漆面积大,但所需时间长,反而降低激光除漆效率。同时,如果激光扫描速度太大,则光斑间搭接率很小甚至为零,此时单道漆层不能完全清除。从光斑间搭接区域面积最小出发理论计算得到,当激光扫描速度 $F=249$ mm/min 扫描道间搭接量为 0.6 mm 时,既能实现漆层的完全去除,又可使除漆效率达到 15.5 mm²/s,获得了较好的效果。

5 结 论

实验研究了低频 YAG 脉冲激光除漆在不同实验条件下的除漆机理以及激光能量对除漆效果的影响和搭接率对激光除漆效率的影响。提出了漆层去除率定量地表征激光除漆效果,用单位时间去除漆层的面积来表征激光除漆效率。比较了氩气和水对激光除漆效果的影响,同时理论计算出激光除漆最理想的搭接率。实验结果表明:

- 1) 在吹氩气时,低频 YAG 脉冲激光除漆机理主要是激光烧蚀效应;采用约束层水时,低频 YAG 脉冲激光除漆机理主要是烧蚀效应和振动效应共同作用。
- 2) 在基体损伤阈值范围内,激光除漆效率随着激光能量密度的增大而增大,约束层水能明显地提高除漆效果,还能极大地提高 FV520B 基体的激光损伤阈值。
- 3) 当激光扫描速度 $F=249$ mm/min,扫描道间搭接量为 0.6 mm,激光能量密度为 0.239 J/cm² 时,激光除漆效率达 15.5 mm²/s,获得了较好的效果。

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 Shi Shudong, Du Peng, Li Wei, *et al.*. Research on paint removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser [J]. Chinese J 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.
- 4 Chen Jufang, Zhang Yongkang, Kong Dejun, *et al.*. Research progress of cleaning tiny particles by short pulsed laser [J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 301-305.
陈菊芳, 张永康, 孔德军, 等. 短脉冲激光清洗细微颗粒的研究进展[J]. 激光技术, 2007, 31(3): 301-305.
- 5 Tan Donghui, Lu Dongsheng. Experiment studies of excimer laser cleaning of grease contaminated Si substrate [J]. Laser Technology, 1995, 19(5): 319-320.

- 谭东晖, 陆冬生. 准分子激光直接清洗硅片上油脂的实验研究[J]. 激光技术, 1995, 19(5): 319—320.
- 6 J M Lee, K G Watkins, W M Steen. Surface cleaning of silicon wafer by laser sparking [J]. J Laser Applications, 2001, 13(4): 154—158.
- 7 S Klein, T Stratoudaki, V Zafiroopoulos, *et al.*. Laser induced breakdown spectroscopy for on line laser cleaning of sandstone and stained glasses [J]. Appl Phys A, 1999, 69(4): 441—444.
- 8 V V Golovlev, M J Gresalfi, J C Miller, *et al.*. Laser characterization and cleaning of 19th century daguerreotypes II [J]. J Culture Heritage, 2003, 4(1): 134—139.
- 9 R Teul, H Scholten, O F van den Brink, *et al.*. Controlled UV laser cleaning of painted artwork: a systematic effect study on egg tempera paint samples [J]. J Culture Heritage, 2003, 4(1): 209—215.
- 10 Wang Zemin, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. Parameters and mechanisms of laser cleaning rubber layer on a tyre mold [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.
- 11 Shi Xingkuan, Xu Chuanyi, Ren Jingxin, *et al.*. Laser cleaning of soft colloid particles on optical substrates surface [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2000, 36(3): 12—15.
- 史兴宽, 徐传义, 任敬心, 等. 光学基片表面软质抛光胶体粒子的激光清洗[J]. 航空精密制造技术, 2000, 36(3): 12—15.
- 12 Ye Yalan. Research on the Surface of the Optical Element with Laser Cleaning Technology [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2010.
- 叶亚兰. 光学元件表面的激光清洗技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2010.
- 13 J Woodroffe. Laser paint stripping [R]. Arco Everett Research Laboratory, Inc. Report No. AFWAL-TR-84-4132, 1985.
- 14 G Schweizer, L Werner. Industrial 2-kW TEA CO₂ laser for paint stripping of air craft [C]. SPIE, 1995, 2502: 57—63.
- 15 Tsunemi A, Hagiwara K, Saito N, *et al.*. Complete removal of paint from metal surface by ablation with TEA CO₂ laser [J]. Appl Phys A, 1996, 63(5): 435—439.
- 16 Chen Jufang, Zhang Yongkong, Xu Renjun, *et al.*. Experimental research of paint removal with a fast axis flow CO₂ laser [J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 64—67.
- 陈菊芳, 张永康, 许仁军, 等. 轴快流 CO₂ 激光脱漆的实验研究[J]. 激光技术, 2008, 32(1): 64—67.
- 17 Zheng Guang, Tan Rongqing, Zheng Yijun, *et al.*. Experimental study on TEA CO₂ laser paint stripping [J]. Laser Journal, 2005, 29(5): 82—83.
- 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, 29(5): 82—83.