

文章编号: 1001-3806(2008)01-0064-03

## 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光脱漆的实验研究

陈菊芳<sup>1,2</sup>, 张永康<sup>\*</sup>, 许仁军<sup>1</sup>, 顾永玉<sup>1</sup>, 张兴权<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏技术师范学院 机械与汽车工程学院, 常州 213001)

**摘要:** 为了获得工艺参数对激光清洗金属表面油漆层效果的影响, 采用波长为 10.6 $\mu\text{m}$  的轴快流 CO<sub>2</sub> 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。结果表明, 脱漆时, 激光功率密度存在着起始清洗阈值、完全清洗阈值和基体损伤阈值, 增加激光功率, 可获得更高的扫描速度和更好的清洗效果; 扫描道间搭接量大于 40% 时, 可实现漆板的大面积清洗。

**关键词:** 激光技术; 激光清洗; 金属表面; 油漆层; 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光

中图分类号: TN249 TG156.99 文献标识码: A

## Experimental research of paint removal with a fast axis flow CO<sub>2</sub> laser

CHEN Jufang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-kang<sup>1</sup>, XU Ren-jun<sup>1</sup>, GU Yong-yu<sup>1</sup>, ZHANG Xing-quan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering Jiangsu University, Zhenjiang 212013 China; 2. School of Mechanical and Automobile Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213001, China)

**Abstract** In order to obtain the relationship between processing parameters and paint removing effects, a fast axis flow CO<sub>2</sub> laser whose wavelength is 10.6 $\mu\text{m}$ , was used to remove paint from aluminum plate surfaces. The relationships between laser power density, scanning velocity, scanning channel overlapping and cleaning effects were investigated. It is shown that there exist initial cleaning threshold, complete cleaning threshold and substrate damage threshold of laser power density for laser beam to remove the paint layer. Higher cleaning efficiency and better cleaning effect can be achieved when laser power is higher, larger area paint can be completely removed when the overlap between scanning channels is larger than 40%.

**Key words** laser technique; laser cleaning; metal surface; paint layer; fast axis flow CO<sub>2</sub> laser

### 引 言

在工业领域, 广泛采用涂漆技术对材料进行防锈防腐, 油漆层出现剥离或脱落需重新涂漆时, 需要对原有的油漆层进行清除。飞机、轮船等每隔几年就要脱漆大修一次, 需要除去表面的旧油漆, 以便喷涂新油漆<sup>[1]</sup>。传统的方法主要采用机械和化学除漆法, 机械法劳动强度大, 噪声污染严重, 且容易损伤基体, 清洗效果也比较差; 化学法严重污染环境, 且不适合局部清洗。激光脱漆技术是近几年发展起来的新技术, 相对于传统方法有着明显优势<sup>[2-3]</sup>: 经济、高效、快捷、便于自动控制; 脱漆过程中的废弃物可在清洗的同时进行收集, 基本不污染环境; 激光脱漆是一种干式清洗, 不消耗水资源。在目前已报道的激光脱漆试验中<sup>[3-5]</sup>, 以脉冲激光为多, 采用连续激光脱漆的报道很少。CO<sub>2</sub> 激光的波长为 10.6 $\mu\text{m}$ , 油漆层对该波长激光强烈吸

收, 而一般金属表面则对其强烈反射, 油漆的燃点较低, 远低于一般金属的熔点, 因此, 采用 CO<sub>2</sub> 激光, 选择合适的工艺参数, 能在完成脱漆的同时不损伤基体表面。LUO 等人<sup>[5]</sup>虽然采用连续 CO<sub>2</sub> 激光对飞机油漆的去除进行了实验研究, 但没有研究工艺参数的变化对脱漆效果的影响。本文中采用连续 CO<sub>2</sub> 激光研究了激光功率密度、扫描速度及扫描道间的搭接量对脱漆效果的影响, 并对其清洗机理进行了分析探讨。

### 1 试验方法及设备

试样采用铝板作基材, 因工业中广泛使用的油漆层厚度为几十微米, 因此, 在试样表面喷涂有 50 $\mu\text{m}$  厚的普通乳白色涂装油漆, 喷漆前依次采用丙酮、乙醇、水对铝板表面进行清洗, 以便去除表面油脂和污物, 增加漆层的附着力, 漆板的尺寸为 250mm × 30mm × 2mm。实验中采用 2kW 的 RS2000SM 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器, 能量连续, 波长 10.6 $\mu\text{m}$ , 光束为准高斯 TEM<sub>10</sub> 模式, 激光束在辐照平面  $x-y$  内的功率密度可表示为<sup>[6]</sup>:

$$P(x, y) = \frac{4P_0(x^2 + y^2)}{\pi w^4} \exp\left[-2\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right] \quad (1)$$

作者简介: 陈菊芳 (1971-), 女, 副教授, 博士研究生, 主要从事激光清洗研究。

\* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

收稿日期: 2006-11-01; 收到修改稿日期: 2006-11-20

式中,  $P_0$  为激光功率,  $w$  为光束半径, 能量在光束内分布比较均匀, 而光束边缘的功率密度较低 (见图 1)。

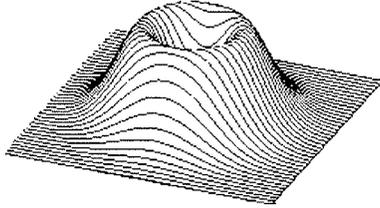


Fig 1 Energy distribution in laser beam

将试样置于数控机床的工作平台上进行脱漆处理, 激光的工艺参数和工作台的运动由计算机控制, 脱漆时采用压强为 0.1 MPa 的氮气作为辅助气体, 以避免脱漆过程中受激光辐照的油漆与空气直接接触燃烧对基体产生较大的热影响, 同时氮气还能起到冷却基体的作用。脱漆时聚焦镜头距离试样大于 150mm, 加上辅助气体能及时将脱漆后的废弃物吹走, 可避免聚焦镜头在脱漆过程中受到污染。脱漆时采用真空吸尘装置对废弃物进行收集处理, 使脱漆过程基本不污染环境; 脱漆示意图见图 2。

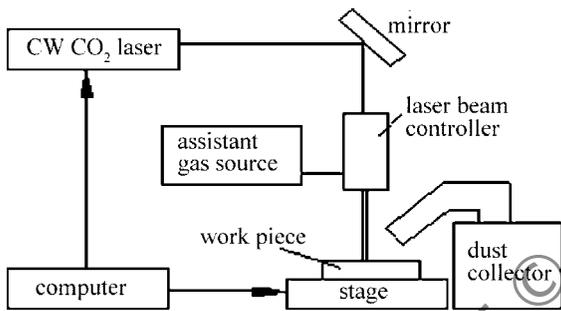


Fig 2 Sketch of laser paint removal

实验中采用激光输出功率  $P_0 = 50W \sim 100W$ , 扫描速度  $v = 1m/m\ min \sim 6m/m\ min$ , 光斑直径  $D = 5mm$ , 激光束直接垂直辐照漆层表面, 每一能量单次扫描 30mm 长的漆层表面, 以便对比分析, 获得最优的脱漆工艺参数。

## 2 实验结果与讨论

实验表明, 脱漆效果受到平均激光功率密度  $F (=$

$\frac{4P_0}{\pi D^2}$ )、扫描速度  $v$  和扫描道间的搭接量等因素的影响。

### 2.1 激光功率密度对脱漆的影响

实验时, 首先将扫描速度固定不变 (取  $3.0m/m\ min$ ), 随着平均激光功率密度的增加, 试样表面形貌变化见图 3。当平均激光功率密度较小时, 激光作用区域的油漆表层在显微镜下观察无明显变化, 继续增加平均激光功率密度, 激光作用区域的油漆表层有浅的去除痕迹。可见, 激光清洗油漆存在起始清洗阈值。随着平均激光功率密度不断提高, 激光作用区域的油漆颜色变灰,

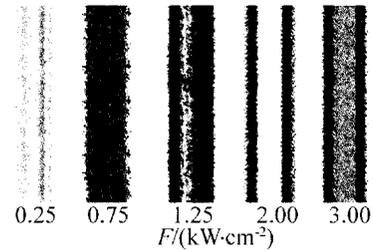


Fig 3 Work-piece superficial status after laser treatment with different power density

激光清洗的痕迹逐渐加深, 漆层不断减薄, 当激光束平均功率密度值升高至一定值时, 铝板表面的清洁率达到 100%, 实现了完全清洗。可见, 激光清洗油漆时存在着完全清洗阈值。当平均激光功率密度进一步增加超过一定值时, 尽管激光完全清除了作用区域的油漆涂层, 但基体出现了微小的弯曲变形, 在光学显微镜下观察基体表面开始出现少量熔化烧蚀现象, 这意味着激光清洗油漆时存在基体损伤阈值。实验结果表明, 当扫描速度为  $3.0m/m\ min$  时, 油漆的起始清洗阈值为  $0.15kW/cm^2$ , 完全清洗阈值为  $1.78kW/cm^2$ , 基体损伤阈值为  $2.80kW/cm^2$ 。因此, 要完成激光清洗, 应将平均激光功率密度控制在完全清洗阈值与基体损伤阈值之间。

### 2.2 激光扫描速度对脱漆的影响

实验时, 将光斑直径固定为  $5mm$ , 激光功率固定在不同的数值, 改变扫描速度。当扫描速度太大时, 激光束与油漆作用时间太短, 不能完全清除油漆层; 扫描速度太小时, 虽然能完全去除油漆, 但也容易对基体造成较大的热影响, 使基体变形、表面产生损伤等。因此, 要完成清洗工作, 应将扫描速度控制在能完全清洗油漆的扫描速度及避免基体损伤的扫描速度之间。实验时, 在光学显微镜下观察激光辐照后的试样表面形貌, 检测在不同的激光功率下实现完全清洗油漆的最大扫描速度及避免基体损伤的最小扫描速度, 实验结果见图 4。

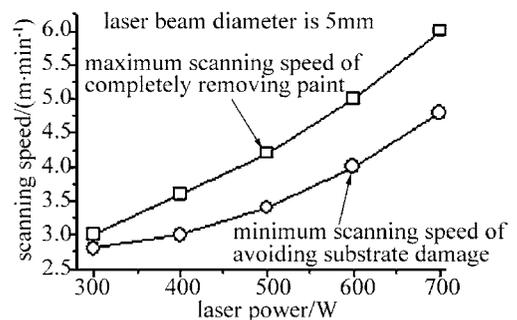


Fig 4 Effects of the laser beam scanning velocity on paint removing

实验结果表明, 当激光功率较小时, 如  $300W$ , 完成脱漆的最大扫描速度接近基体损伤的扫描速度, 不太适于工程应用, 随着激光功率的增加, 完成脱漆的最

大扫描速度与基体损伤的扫描速度的差距增加,适于工程应用。由于激光能量连续,对于基体的散热不利,因此,在提高功率的同时,还需要通过提高扫描速度来降低基底材料的温度升高,减小基底材料升温变形烧伤等。

### 2.3 扫描道间的搭接量对脱漆的影响

由于实验中所用激光模式为准高斯型,激光束内能量的分布见图 1,光束中心能量分布比较均匀,但光束边缘能量较低,因此,扫描道边缘的油漆难以完全清除,各扫描道间需要有一定的搭接量才能实现大面积的完全清洗。取激光功率为 500W、光斑直径为 5mm、扫描速度为 40m/min 的条件下进行实验,实验结果表明,扫描道间的进给量为 3.5mm,即行间搭接量约为 40%时,实现了油漆的完全清洗。

考虑搭接量的影响,不同激光功率下,清除单位面积的油漆所需消耗的激光能量  $Q$ ,  $Q = \frac{\text{消耗的激光能量}}{\text{消除的油漆面积}}$ ,见图 5。由图可见,随着激光功率的

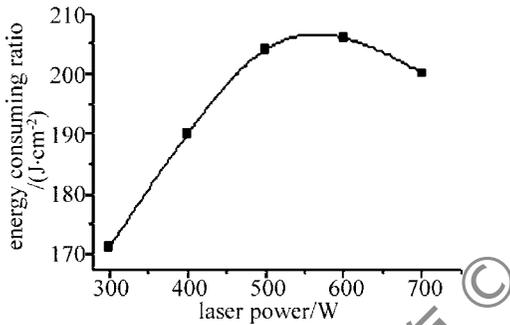


Fig 5 Energy consumption ratio in paint removal under different laser power

增加,清除单位面积的油漆所需消耗的激光能量先是增加,随后又逐渐减小,当激光功率为 500W ~ 600W 时,达到最大值。由图 4 可见,当激光功率小于 500W 时,随着激光功率的增加,完成脱漆的扫描速度增加缓慢,因此,随激光功率的增加,清除单位面积的油漆所需消耗的激光能量增加;当激光功率不小于 500W 时,随着激光功率的增加,完成脱漆的扫描速度增加较快,在脱漆过程中,向基体及周围环境扩散损失的能量减少,激光能量利用率提高,因此,曲线呈下降趋势。考虑到激光能量的利用率及脱漆时对基体的热影响,采用轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器脱漆时,激光功率应选择大于 600W。

### 3 脱漆机理分析

脱漆所用激光为 CO<sub>2</sub> 激光,波长 10.6μm,属红外激光,波长较长,光子能量较小,在激光辐照下基本不会引起油漆分子的光化学分解,因此,CO<sub>2</sub> 激光脱漆的主要机理是热效应引起油漆层瞬间燃烧和汽化,使漆

层快速脱落,同时,热效应也会引起油漆层的快速热膨胀,使漆层有脱离基体的趋势,由辅助气体氮气吹离基体表面。激光脱漆过程中,光束中心表面升高的温度  $T_s$  可近似按下式计算<sup>[7]</sup>:

$$T_s = \frac{2(1-R)F}{\kappa} \sqrt{\frac{at}{\pi}} \quad (2)$$

式中,  $(1-R)$  为表面对激光的吸收率,  $F (= \frac{4P_0}{\pi D^2})$  为平均激光功率密度,  $P_0$  为激光功率,  $D$  为光斑直径;  $\kappa$  为热传导率,  $a (= \kappa / \rho c_p)$  是热扩散率,  $\rho$  为材料密度,  $c_p$  为材料比定压热容,  $t$  是激光作用时间。令  $T_v$  表示漆层的汽化温度,  $T_m$  表示铝的熔点,由于  $T_v < T_m$ , 为保证只除去漆层而不影响基体,必须要求材料表面温度  $T_s$  满足:  $T_v \leq T_s \leq T_m$  条件,即要求对应的平均激光功率密度:  $F_v \leq F_s \leq F_m$ , 当  $F$  左边取等号时,就得到激光脱漆的起始清洗阈值  $F_v$ , 右边取等号时,即为激光清洗的基体损伤阈值。因此,当能量条件满足上式时,就可以用激光除去漆层而不损伤基体。

表面油漆层对波长 10.6μm 的激光强烈吸收,被吸收的激光在漆层内部的穿透深度  $x$  与光强  $I$  遵从朗伯定律  $I = I_0 e^{-\alpha x}$ , 油漆的吸收系数  $\alpha \approx 10^6 \text{ m}^{-1}$ , 因此,激光在漆层中的穿透深度只有几微米<sup>[8]</sup>, 而且油漆层的热导率很低,因此,在激光辐照下,热量在油漆表层积聚,表面温度迅速上升,达到油漆的熔点、沸点及燃点以上,导致漆层瞬间发生气化挥发,或受热燃烧,从而产生火花和烟雾,使得表面漆层脱落。实验所用的漆层厚度为 50μm, 辐照在漆板表面的激光束不能一开始就透过漆层直达基体表面,在激光作用下,漆层逐层脱落,厚度不断减薄,在一定的激光功率下,当扫描速度较大时,激光辐照时间较短,就只能除去漆层中的一部分;当扫描速度较小时,激光辐照时间较长,油漆分层次地被除掉,直至完全将漆层清除。对于金属基底,一般对波长为 10.6μm 的 CO<sub>2</sub> 激光都有很高的反射率,特别是实验所用铝板,对波长为 10.6μm 的激光强烈反射,室温下反射率高达 98%<sup>[9-10]</sup>, 因此,当油漆清除后,过量的激光辐照在基体表面并不会引起基体温度的很大升高。另外,铝的热导率很高,当激光束移走后,可通过基体本身进行快速冷却。因此,当工艺参数适当时,能完全清除漆板表面的油漆而不损伤基体。

### 4 小 结

由于油漆能强烈吸收波长为 10.6μm 的 CO<sub>2</sub> 激光,油漆的燃点远低于一般金属的熔点,而一般的金属表面对该波长激光强烈反射,完成脱漆后,过量的激光

FRA的阈值从数值上稍微高于同向抽运 FRA,但因差别很小,两者曲线几乎重合,说明  $L_{eff}$ 对两种抽运方式 FRA的阈值影响相似。

(4)同向抽运 FRA的阈值还受到抽运光和信号光的频率比等因素的影响。

### 3 结 论

通过数值仿真 SRS现象,描述了阈值的产生过程。要指出的是,这里着重描述阈值前后 SRS光强的不同。当抽运光强大于阈值光强后,SRS光强将呈现指数形式的增长,并可能出现多阶 SRS现象,其具体分析过程详见其它文献。

理论推导了同向抽运和反向抽运 FRA的阈值公式,其推导的前提条件强调与实际情况相吻合。并且,采用5种典型光纤的参数,对阈值公式进行了详细分析,结果表明:抽运方式不同,阈值不同;而且,同一种抽运方式中,各参量对阈值的影响也不同。可据此结论来优化参量,降低 FRA的阈值,提高 FRA的抽运效率。当然,设计 FRA需要考虑多方面的因素,因此上述结论仅作为设计 FRA的参考,同时对 FRA的实验有一定参考价值。

#### 参 考 文 献

[1] ROTTWITT K, POVLSEN JH. Analyzing the fundamental properties of Raman amplification in optical fibers [J]. IEEE Journal of Light

wave Technology 2005, 23(11): 3597-3605.

- [2] WU B LIK, KONG FM, *et al*. A study of the simulation algorithm for multipumped broadband Raman amplifier [J]. Laser Technology 2005, 29(4): 410-413 (in Chinese).
- [3] LONG Q Y, KONG FM, *et al*. Simplified model design and pump optimization of multipumped fiber Raman amplifiers [J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 333-336 (in Chinese).
- [4] DENG H Q, LONG Q Y, WU J F. Gain characteristics of forward pumped Raman fiber amplifier [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2005, 33(10): 44-47 (in Chinese).
- [5] DENG H Q, LONG Q Y. Analysis of the gain characteristics of backward-pumped fibre Raman amplifier [J]. Acta Photonica Sinica 2006, 35(10): 1534-1537 (in Chinese).
- [6] LONG Q Y, WU T W, DENG H Q. The analysis of critical condition of fiber Raman amplifier [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 34(1): 35-37 (in Chinese).
- [7] XIN X J, YU CH X, REN JH, *et al*. Analysis of the threshold of Raman fiber amplifiers [J]. Acta Photonica Sinica 2002, 31(8): 1003-1006 (in Chinese).
- [8] GENG X, ZHANG ZH. Simulink and its application in fiber telecommunication [J]. Computer Simulation, 2002, 20(12): 121-123 (in Chinese).
- [9] LIU X K, GARMIRE E. Understanding the formation of the SRS Stokes spectrum in fused silica fibers [J]. IEEE J Q E, 1991, 27(4): 1022-1030.
- [10] SHI Sh X, CHEN G F, ZHAO W, *et al*. Nonlinear optics [M]. Xi'an Xidian University Press, 2003, 440-442 (in Chinese).
- [11] JIA D F, LI Sh Ch, SONG L J. Optimized design of fiber Raman amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(7): 808-811 (in Chinese).

(上接第 66页)

照射在基体表面不会造成基体表面温度的很大升高。另一方面,一般金属的热导率很高,当激光束移走后,可通过金属基体本身进行快速冷却,当工艺参数适当时,可以在不损伤基体的前提下完全去除基体表面的油漆层。激光功率密度在脱漆过程中是非常重要的参数,增加功率可去除更多的油漆。如果在增加功率的同时提高扫描速度,则可以减小激光束与物质的作用时间,减小对基体的热效应,减小基体的变形、表面损伤等,同时可提高脱漆速度。选取合适的工艺参数,能完全清除漆板表面的油漆而不损伤基体,并可获得高的清洗效率和好的清洗效果。

#### 参 考 文 献

[1] SONG F, LIU S J, ZOU W F. Laser cleaning—removal of rust and paint [J]. Cleaning World 2005, 21(11): 38-41 (in Chinese).

[2] KIM T, LEE JM, CHO SH, *et al*. Aoustic emission monitoring during laser shock cleaning of silicon wafers [J]. Optics and Laser in Engi-

neering 2005, 43(9): 1010-1020.

- [3] BRYGO F, DUTOUQUET C, GUERN F L, *et al*. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation [J]. Applied Surface Science 2006, 252(6): 2131-2138.
- [4] DAURRLO G, CHIFFA M, CINQUEPALM IM. Laser surface cleaning: de-rusting, de-painting and de-oxidizing [J]. Appl Phys 1999, A69(7): S543-S546.
- [5] LUO H. X, CHEN Z G. High power CO<sub>2</sub> laser using in aircraft laser paint removing [J]. Laser Journal 2002, 23(6): 52-53 (in Chinese).
- [6] LI J C. Laser diffraction and heat effect calculation [M]. Beijing Science Press 2002, 341-432 (in Chinese).
- [7] WATKINS K G, CURRAN C, LEE JM. Two new mechanisms for laser cleaning using Nd:YAG sources [J]. Journal of Cultural Heritage 2003, 4(S1): 59-64.
- [8] ROBERTS D E. Pulsed laser coating removal by detachment and ejection [J]. Appl Phys 2004, A79(5): 1067-1070.
- [9] ZHANG Y K, ZHOU J Z, YE Y X. Laser process technology [M]. Beijing Chemical Industry Press 2004, 106-122 (in Chinese).
- [10] GUO Y J, LU C S, HE C L, *et al*. 89-1 coating for laser surface hardening [J]. Laser Technology, 2002, 26(4): 252-254 (in Chinese).