

文章编号:1001-5078(2011)08-0840-05

· 激光应用技术 ·

激光清洗应用于清除城市涂鸦

朱玉峰^{1,2}, 谭荣清¹

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:探索了激光清洗去除涂鸦这一新型应用,并且针对清洗技术中的关键问题——激光能量密度对清洗效率的影响,进行研究。给出 TEA CO₂ 激光在不同情况下的清除涂鸦的实验数据。验证了 TEA CO₂ 激光适用于激光清除涂鸦,效果显著。实验发现,当激光能量密度为 4~6 J/cm² 时,去除效率最高,实验中单位能量去除的涂鸦面积超过 2.5 cm²/J。分析了激光作用过程中的原理机制,得出初步结论:能量密度低于 4 J/cm² 时,基底和表层材料对 CO₂ 激光的吸收系数差异引发的热效应起主要作用;在最佳能量密度范围内,激光等离子体爆发产生的力学冲击效应为主要作用机制;能量密度超过 6 J/cm² 时,样品表面空气被击穿,消耗大量激光能量,去除效率明显下降。

关键词:去除涂鸦;激光清洗;TEA CO₂ 激光器

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.004

Graffiti removal-new applications of laser cleaning

ZHU Yu-feng^{1,2}, TAN Rong-qing¹

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Research is carried out for laser cleaning applied in graffiti removal. With traditional mechanical and chemical methods, there is an obvious risk of over-cleaning and possible damage to the object surface. The laser graffiti removal is a non-contact, easily controlled method that leads to better preservation of the surface. The efficiency of laser graffiti removal versus laser energy density, which is one of the main problems for laser graffiti removal, is investigated through experiments. A high-power high-repetition rate TEA CO₂ laser is employed for laser graffiti removal on different substrates and sample surfaces, and experimental data are given. The experimental data have proved that TEA CO₂ laser is suitable for graffiti removal; the results are convincing and effective. It is shown that the highest efficiency of graffiti removal and the fastest speed of laser cleaning can be reached for the given samples when laser fluence is between 4 J/cm² and 6 J/cm², and the areas of graffiti removed per joule by laser cleaning have been more than 2.5 cm²/J. The main mechanisms involved in laser cleaning, are analyzed and some preliminary conclusions of two main mechanisms are given. When the laser fluence is less than 4 J/cm², the thermal effects produced by the large absorption coefficient of graffiti materials to the laser energy play an important role. In the range of optimal fluence between 4 J/cm² and 6 J/cm², the effects of shock waves produced by plasma detonation rather than the thermal effects are considered as the dominating process. When the laser fluence exceeds 6 J/cm², the air near sample surface is breakdown, which consumes most of laser energy, thus the removal efficiency decreases significantly, the thermal and mechanical effects are not obvious.

Key words: graffiti removal; laser cleaning; TEA CO₂ laser

基金项目:中国科学院知识创新领域前沿项目(No. D5090-03)资助。

作者简介:朱玉峰(1986-),男,硕士,主要从事可调谐气体激光器及应用等方面研究。E-mail: zhuyufengzhu@gmail.com

收稿日期:2011-03-29; **修订日期:**2011-04-21

1 引言

激光清洗自提出后,已经得到了越来越广泛的应用。激光清洗技术^[1]是指采用激光束照射工件表面,使其表面的附着物或涂层等发生瞬间蒸发或剥离,从而达到洁净化的工艺过程。与机械摩擦清洗、化学腐蚀清洗、液体固体强力冲击清洗、高频超声清洗等传统清洗方法相比,激光清洗技术具有“绿色”环保,无污染,无接触,高清洁度,清洗效率高和低成本等优点,广泛应用于工业模具清洗^[2]、微电子器件清洗^[3]、除锈脱漆^[4]、文物保护^[5]、建筑清洗等领域。而激光清洗在清除涂鸦^[6],去除污染城市文明环境的涂鸦材料方面也有重要应用。本文研究了激光能量密度和激光作用机理等影响激光去除涂鸦效率的因素,并针对实际情况进行多组对比实验,给出了实验结果。

2 实验装置与方法

激光清洗的工作原理^[7]就是利用激光束照射物体表面,使要去除的污物产生振动、熔化、蒸发、燃烧等一系列物理化学变化,最终脱离物体表面。激光照射到物体表面,同时产生许多物理化学变化,有选择性蒸发、快速加热和冷却产生的热应力、蒸发压力、等离子体爆轰(散裂)和切除等作用过程,这些因素都会对实际激光清洗效率产生影响。就清洗物表面材料光学特性分析,可以将激光清洗机理分为两大类:一类利用基底与表面附着物对某一波长激光能量吸收系数差别特别大,辐射时激光能量大部分被表面附着物吸收,使其受热、汽化或瞬间膨胀,脱离物体表面,达到清洗目的,而基底吸收系数小,未受到损伤。另一类利用高功率高重复频率的脉冲激光冲击被清洗的表面,使部分光束能量转换成声波能量,声波冲击污物层,产生小范围爆炸,污物层被压成碎屑或粉末,纷纷从基底表面脱落。对于激光去除涂鸦的应用,常见的样品基底材料大致可分为铁、铝、铜、不锈钢等固体金属材料 and 混凝土、石灰、砖块、玻璃等固体非金属材料等两大类。而涂鸦材料一般为胶纸及油漆、颜料、浆糊等几类。对于油漆、颜料等涂覆于基底材料的情况,可参考有关激光除锈脱漆的文章著作,本文主要探索最为常见的胶纸类材料涂覆于金属非金属固体上的去除涂鸦实验。选用高功率高重复频率(transversely excited atmospheric-pressure, TEA)横向激励大气压 CO₂ 激

光,其 10.6 μm 的输出波长容易被涂鸦层吸收,胶纸类涂鸦材料对于激光波长的吸收系数大,而常见的铁、铝、铜等金属基底材料^[8]和混凝土等建筑类材料对于 CO₂ 激光的吸收系数小,基底的损伤轻微。同时 TEA CO₂ 激光能够实现高功率高重复频率输出,作用于物体表面力学冲击效应效果显著,利于清除。CO₂ 激光清除涂鸦,两种物理过程同时作用,本文研究在不同实验条件及能量密度值下,两种作用过程的重要性和主次关系。

实验中采用的激光器是本实验室研制的高功率高重复频率 TEA CO₂ 激光器^[9-10]。激光输出波长为 10.6 μm,输出光斑直径约为 26 mm,图 1 是激光的输出光斑图和激光脉冲波形图。激光器单脉冲输出能量测得为 2.0 J。所使用的激光清洗实验装置如图 2 所示。由 TEA CO₂ 激光器输出的脉冲激光,经反射型聚焦镜聚焦后,照射到样品上进行激光清洗去除。聚焦镜的焦距为 250 mm。通过调整聚焦镜与样品的距离,可以在一定范围内控制样品上光斑的大小,以便得到不同的能量密度^[11]。样品装载在光学升降台上,升降台置于水平导轨上,通过升降台的旋钮可以调节样品的高度,导轨可实现样品水平方向位移。

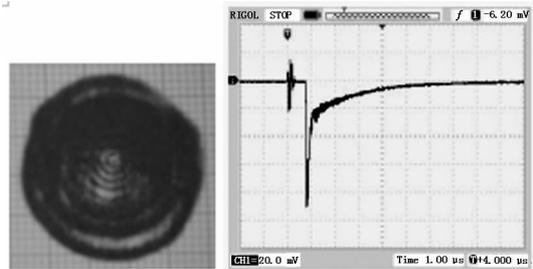


图 1 激光输出光斑和光脉冲波形图

Fig. 1 laser spot and the optical waveform

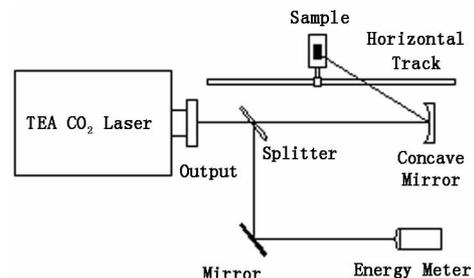


图 2 激光去除涂鸦装置示意图

Fig. 2 schematic diagram of graffiti removal

以青砖作为基底粘贴上单面胶纸为实验样品,用反射率为 90% , $f = 250$ mm 的铜凹面镜将激光光束聚焦于样品。通过调整聚焦镜与样品的距离,可

以控制样品上光斑的大小,从而获得不同的能量密度。测量样品所在位置的光斑面积,用激光能量($2.0 \times 90\%$)除以光斑面积,即得到能量密度 I_w 。记录去除光斑面积大小样品所需的脉冲次数,定义单位能量所去除的样品面积为 A ,单位是 cm^2/J 。同时定义去除单位面积所需的能量 P_1 ,单位是 J/cm^2 。 A 值越大, P_1 值越小,能量的利用效率越高。

3 实验结果

以聚焦镜到样品之间距离为参考值,测量不同能量密度值所去除的样品情况,实验数值如表 1 所示。

表 1 不同激光能量密度对去除效率的影响

Tab. 1 removal efficiency of different laser fluence

光斑直径/ mm	光斑面积/ mm^2	能量密度/ $(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	单位能量 去除面积/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{J}^{-1})$	去除单位面 积需能量/ $(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$
26	5.309	0.367	0	$\gg 50$
10	0.785	2.483	1.151	0.8689
9	0.636	3.065	1.305	0.7662
8.5	0.568	3.436	2.078	0.4811
8	0.503	3.879	2.578	0.3879
7	0.385	5.067	2.815	0.3545
6	0.283	6.897	2.416	0.4138
5	0.196	9.931	1.678	0.5957
3	0.071	27.59	0.3625	2.759
2.5	0.049	39.73	0.2287	4.370
2	0.031	62.07	0.1610	6.207
1.5	0.018	110.4	0.0605	16.55

图 3、图 4 分别给出了单位能量所去除的面积 A 和去除单位面积所需能量 P_1 与激光能量密度 I_w 的变化关系。图 5 为光斑直径 7 mm,激光能量密度为 $5.067 \text{ J}/\text{cm}^2$ 处样品在不同脉冲次数下实验效果图。图 5(a) 为未用激光照射的样品(以红白相间的单面胶纸粘贴于青砖样品上);激光脉冲照射 2 次后,单面胶纸表面胶层和部分纸层被清除,如图 5(b) 所示,图中白色圆形区域即为光斑大小。脉冲次数为 5 次时,由图 5(c) 中可见部分纸层被去除,露出青砖基底;脉冲次数为 8 次后,如图 5(d) 所示纸层被完全去除,基底状况良好。

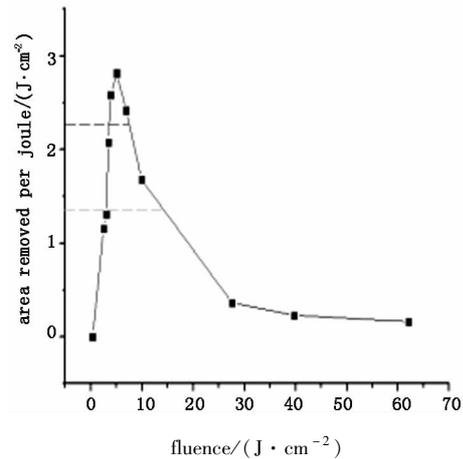


图 3 单位能量去除的面积随能量密度变化曲线(基底为青砖)

Fig. 3 curve of area removed per joule versus fluence (substrate is brick)

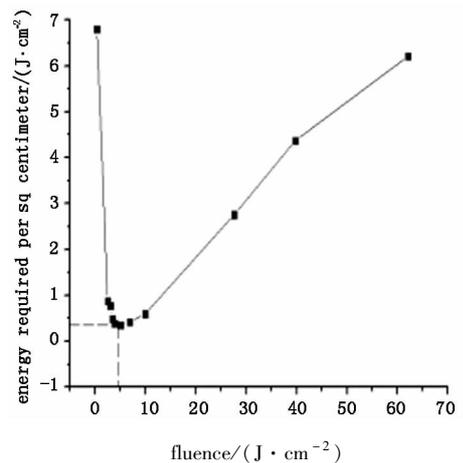


图 4 去除单位面积所需能量随能量密度的变化曲线(基底为青砖)

Fig. 4 curve of energy required for removing per square centimeter versus fluence (substrate is brick)

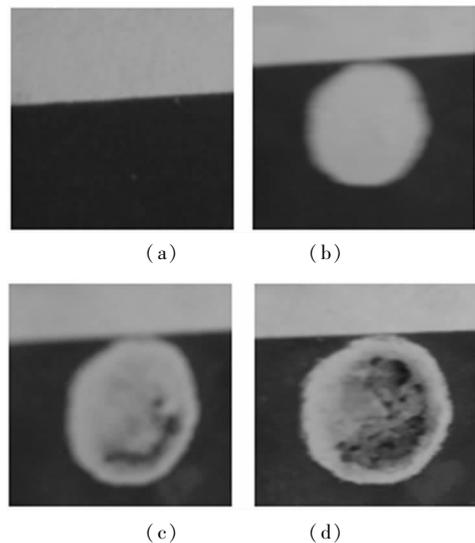


图 5 脉冲次数为 0,2,5,8 次的样品去除实例

Fig. 5 instances of sample removed when laser pulses is 0,2,5,8 times

4 结果分析

将相同的激光能量以不同的能量密度辐照到样品上,获得的脉冲去除的光斑面积随能量密度的变化曲线如图3所示。图3中曲线呈现先升后降的趋势,峰顶较为尖锐。以纵轴峰值的80%为最佳能量密度范围时,能量密度约在 $4 \sim 7 \text{ J/cm}^2$ 。若以纵轴峰值的50%计算,能量密度范围为 $3.5 \sim 14 \text{ J/cm}^2$ 。当能量密度超过 7 J/cm^2 后,单位脉冲去除的样品面积随着能量密度的增加而显著下降;因为靶面处的大气被击穿,这个过程消耗了大量的激光能量,被样品纸层吸收的能量反而降低,所以去除的面积下降,需要的脉冲数显著增加,激光的利用效率^[12]下降。在最佳能量密度值时,单位能量去除的光斑面积达到 $2.815 \text{ cm}^2/\text{J}$,单位能量去除的表面涂鸦材料的质量为 $28.53 \text{ mg}/\text{J}$ 。图4中可以看出,去除单位面积涂鸦材料存在最低能量值,位于能量密度值为 5 J/cm^2 处。

笔者进行多组不同实验,比较不同基底、基底表面形状、粗糙度和不同样品、样品厚度、质地等情况下测量的实验数据,得出上述实验曲线具有大致普遍性。图6、图7为基底为铝材,样品为双层单面胶纸的激光清除效率随激光能量密度的变化关系,由图可以看出,曲线形状基本类似,最佳能量密度位于 $3.5 \sim 6 \text{ J/cm}^2$ 区间内,且在峰值区间内,单位能量去除的涂鸦面积超过 $2.5 \text{ cm}^2/\text{J}$ 。综合以上,激光清除涂鸦存在最佳能量密度值范围,约为 $4 \sim 6 \text{ J/cm}^2$ 。

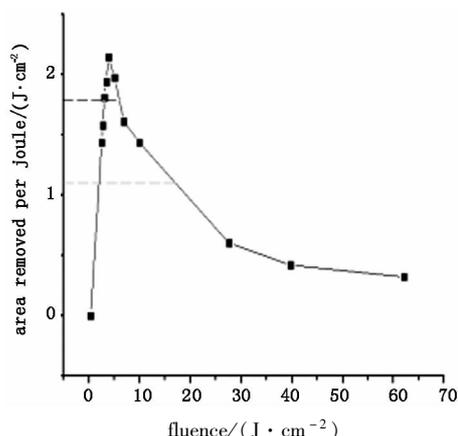


图6 单位能量去除的面积随能量密度的变化曲线(基底为铝材)

Fig.6 curve of area removed per joule versus fluence (substrate is aluminum)

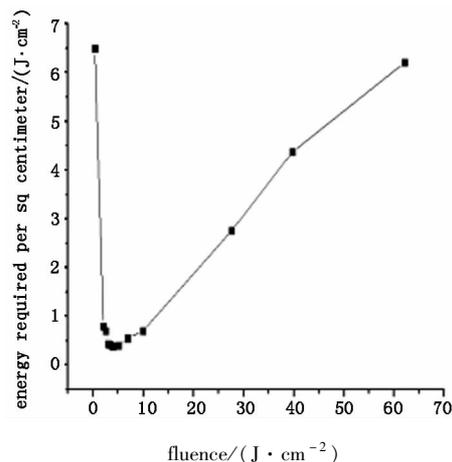


图7 去除单位面积所需能量随能量密度的变化曲线(基底为铝材)

Fig.7 curve of energy required per square centimeter versus fluence (substrate is aluminum)

激光作用于样品表面过程中,同时产生热学效应和力学冲击效应。当激光能量密度小于 4 J/cm^2 ,单脉冲打在基底上,涂鸦层变化不明显,去除效果缓慢。以单脉冲能量密度约 3 J/cm^2 的重复频率激光扫描样品,样品被点燃,产生大量浓烟,并伴有火光,基底温度也很高,这是样品层被激光快速加热至燃点而燃烧的物理过程,主要是热效应作用过程,不宜用于激光清除涂鸦。当激光能量密度位于 $4 \sim 6 \text{ J/cm}^2$ 之间时,单脉冲作用于样品,发出沉闷的“啪”声,并随着能量密度的升高,声音越来越响亮。样品表面有明显脱落现象,部分基底可见,同时伴随有发光现象,颜色接近白光,但没有浓烟产生。此时样品层被激光瞬时加热,表面附着层膨胀,发生粉碎性爆炸,样品纷纷脱落,这是主要消耗激光能量的物理过程。此外,也有极少部分样品燃烧汽化等现象,但不是主要作用过程。当激光能量密度超过 6 J/cm^2 时,单脉冲作用于样品,产生更为响亮的“啪”声,样品表面空气中有响亮的爆破声并伴有强光,但去除效果下降,这是因为能量密度过大,样品表面大气被击穿,消耗大部分激光能量,真正有作用的能量反而下降,激光利用效率降低。

5 结论

TEA CO_2 激光应用于激光清除涂鸦取得了良好效果,通过实验表明,当激光能量密度位于 $4 \sim 6 \text{ J/cm}^2$ 之间,此时激光能量的利用效率最高,单位脉冲能量所能去除的样品面积也达到最大值。能量密度低于 4 J/cm^2 时,基底和表层材料对 CO_2 激光的吸收系数差异引发的热效应起主要作用;在

最佳能量密度范围内,激光快速加热和冷却产生的力学冲击效应强于热效应及其他物理化学作用,是主要作用机制;能量密度超过 6 J/cm^2 时,样品表面空气被击穿,消耗大量激光能量,去除效率明显下降。本实验中在最佳能量密度范围时,单位能量去除的光斑面积超过 $2.5 \text{ cm}^2/\text{J}$,最大值达到 $2.82 \text{ cm}^2/\text{J}$,单位能量去除的表面污物的质量为 28.53 mg/J 。且在最佳能量密度范围内,激光产生的声波冲击效应强于热效应,是去除涂鸦的主要作用过程。

参考文献:

- [1] Zhang Kuiwu. Laser cleaning technical review [J]. Applied Laser, 2002, 22(2): 264 - 268. (in Chinese)
张魁武. 激光清洗技术评述 [J]. 应用激光, 2002, 22(2): 264 - 268.
- [2] Wang Hongrui. Principle and applied research on laser cleaning [J]. Cleaning World, 2006, 22(9): 20 - 23. (in Chinese)
王宏睿. 激光清洗原理与应用研究 [J]. 清洗世界, 2006, 22(9): 20 - 23.
- [3] Zhao Zhiming. The application of Laser cleaning technology in microelectronics field [J]. Cleaning Technology, 2004, 2(8): 29 - 34. (in Chinese)
赵志明. 激光清洗技术在微电子领域的应用 [J]. 洗净技术, 2004, 2(8): 29 - 34.
- [4] G Schweizer, L Werner. Industrial 2 kW TEA CO₂ laser for paint stripping of aircraft [J]. SPIE, 25, 02: 57 - 62.
- [5] Song Feng, Su Ruiyuan. Laser cleaning of artworks [J]. Cleaning World, 2005, 21(10): 34 - 37. (in Chinese)
宋峰, 苏瑞渊. 艺术品的激光清洗 [J]. 清洗世界, 2005, 21(10): 34 - 37.
- [6] Sasha Chapman. Laser technology for graffiti removal [J]. Journal of Culture Heritage, 2000, 1: S75 - S78.
- [7] K G Watkins. Mechanisms of laser cleaning [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3888: 165 - 174.
- [8] Yangsook Koh. Cleaning of corroded iron artifacts using pulsed TEA CO₂ and Nd:YAG lasers [J]. Journal of Cultural Heritage, 2003, 4: 129 - 133.
- [9] Tan Rongqing, Wan Chongyi. Investigation on tunable high repetition rate TEA CO₂ laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(6): 739 - 742. (in Chinese)
谭荣清, 万重怡. 高重复频率可调谐 TEA CO₂ 激光研究 [J]. 中国激光, 2005, 32(6): 739 - 742.
- [10] Zeng Yuan, Tan Rongqing. Research on stability of tunable TEA CO₂ laser resonator [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(9): 928 - 929. (in Chinese)
曾元, 谭荣清. 可调谐 TEA CO₂ 激光器谐振腔结构稳定性研究 [J]. 激光与红外, 2009, 39(9): 928 - 929.
- [11] Roy Henderson, Karl Schulmeister. Laser safety [J]. IOP Publishing Ltd, 2004: 27 - 30.
- [12] Zheng Guang, Tan Rongqing, et al. Experimental study on TEA CO₂ laser paint stripping [J]. Laser Journal, 2005, 26(5): 82 - 84. (in Chinese)
郑光, 谭荣清, 等. TEA CO₂ 激光脱漆实验研究 [J]. 激光杂志, 2005, 26(5): 82 - 84.