

# 激光清洗技术研究及应用

王 敏 周建忠 黄 舒 胡玲玲

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 激光清洗是一种新型高效的环保清洗技术,其利用激光的方向性和高亮度来清除掉材料表面的污染物,而对基质材料没有破坏。本文介绍了激光消融、干式激光清洗和湿式激光清洗的机理,重点分析了干式激光清洗和湿式激光清洗的原理及影响因素,介绍了激光清洗在精密器件清洗、文物及较大尺寸零件的清洗方面的应用。在此基础上引入一种激光清洗的评价体系,阐述了激光清洗质量的评价方法。

**关键词** 激光技术; 激光消融; 激光清洗; 评价体系; 环境保护

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL200936s1.0174

## Research Status and Application of Laser Cleaning

Wang Min Zhou Jianzhong Huang Shu Hu Lingling

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** Laser cleaning is a novel and effective cleaning technique, which uses the excellent directionality and high brightness of laser to clean the contaminants on the surface of materials, while does not destroy the substrate. In this paper, the main three cleaning principles with laser ablation, dry laser cleaning and wet laser cleaning are introduced, the mechanisms and influencing factors for dry laser cleaning and wet laser cleaning are analyzed detailedly. The laser cleaning applications in the fields of precise components, cultural relics and upsize components are also presented. Finally, an evaluating system for laser cleaning is introduced and the evaluating criterion of cleaning quality is established.

**Key words** laser technique; laser ablation; laser cleaning; evaluating system; environment protection

## 1 引 言

传统的清洗方法是指用水或其他液体来清洗固体表面的污染物。随着科技的进步,出现了如机械清洗法、化学清洗法、超声波清洗法等新技术。这些清洗方法主要清除以锈迹和油脂为主的混有颗粒的表面污染物,在很大程度上满足了现有工业生产和日常生活的需求。但上述方法成本较高,需要使用水和化学溶剂,操作不方便,而且化学去污剂会对地球环境、河流造成二次污染,甚至可能破坏大气层,危害人体健康。环境保护和高精度要求给清洗技术的发展带来了巨大的挑战和前所未有的机遇。激光清洗技术逐渐成为人们关注的热点<sup>[1]</sup>。

## 2 激光清洗的概念

污染物附着在基底材料上是因为有力的作用,包括共价键、双偶极子、毛细作用、氢键、范德瓦尔斯力和静电力等作用力。激光清洗,就是将高亮度和方向性好的激光,通过光学聚焦整形系统形成高能量的激光束,照射于物品需要清洗的部位,激光器发射的光束被处理表面的污染层所吸收,从而破坏污染物和物体之间的作用力,通过光剥离、气化、超声波等过程,使污染物离开物体表面,达到清洗的目的,而不损坏物体本身。在清洗时,针对不同的污染物、污染程度以及不同的基体物质,设定不同的激光能量密度,以确保污染物脱离而不损伤基体物质<sup>[2]</sup>。

**作者简介:** 王 敏(1986—),女,硕士研究生,主要从事激光清洗和激光微喷丸等方面的研究。

E-mail: 156wangmin@163.com

**导师简介:** 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光新技术应用和模具设计制造新方法等方面的研究。

E-mail: zhujz@ujs.edu.cn

### 3 激光清洗的分类

激光清洗分为以下三种类型：激光消融、干式激光清洗和湿式激光清洗。激光消融是通过气化去除薄的表面层；干式激光清洗是把激光能量转化为颗粒动能而去除表面颗粒；湿式激光清洗是在激光辐射前于被污染物表面涂覆一层液体薄膜，通过液膜爆破去除颗粒<sup>[3]</sup>。

#### 3.1 激光消融

激光消融是一种很有研究价值的表面清除方法，目标表面的薄层迅速吸收能量蒸发去除，而由于精确的“冷”消融过程，基体不受影响。激光消融能有效去除金属，减少二次污染且易控制，产品容易恢复，有利于贵金属的回收和二次利用，节约资源，保护环境<sup>[4]</sup>。

#### 3.2 干式激光清洗

##### 3.2.1 清洗机理

干式激光清洗，利用激光直接辐照基体表面，通过基体或颗粒受热瞬时膨胀产生的巨大反弹力去除颗粒。

基体对激光强吸收而颗粒透明或弱吸收时[见图 1(a)]，基体瞬时受热快速膨胀，吸附在基体表面的颗粒获得一定的速度和加速度，脉冲过后，基体快速冷却收缩，颗粒由于惯性脱离基体表面。

颗粒对激光强吸收而基体弱吸收时[见图 1(b)]，在激光辐照下，颗粒吸收能量后快速升温，颗粒内的温度升高是不均匀的，离辐照表面越远，温度升高越小。温度的快速升高引起颗粒的快速热膨胀，附着力限制了颗粒的快速膨胀，在颗粒内引起热应力，其数值大于单位面积上的附着力时颗粒就弹出<sup>[5,6]</sup>。

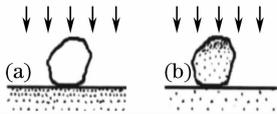


图 1 干式激光清洗

Fig. 1 Dry laser cleaning

##### 3.2.2 影响因素及规律

干式激光清洗效果主要受材料及激光参数如激光能量密度、激光波长、激光脉冲宽度和脉冲次数等的影响。激光波长影响基体、颗粒对激光的吸收率，从而影响去除效果，一般波长越短，材料对激光的吸收率越高，清洗率越高；激光脉冲宽度影响材料的热扩散长度及作用时间，从而影响去除效果，脉冲宽度越短颗粒获得的加速度越大，颗粒越容易清除，同时脉冲宽度越短，能量在表层积聚，容易造成基体损

伤；脉冲次数增加清洗率增加，但脉冲次数对清洗率有饱和性，开始的脉冲清洗率较高，脉冲达到一定数量后不再具有清洗效果。脉冲重复频率对清洗效果影响不大。

研究表明，激光斜角入射时，清洗速度更高，且对基体的损伤大大降低，甚至没有损伤。对透明基体，可从反面入射去除颗粒<sup>[7]</sup>。激光与基体平行入射时，将与基体平行的激光聚焦于距离基体表面几毫米处，焦点处高强度的激光引起周围气体爆炸，产生等离子体冲击波将颗粒清除，该方法也称激光冲击清洗。该方法能清除纳米级的细微颗粒，清洗速度高于激光垂直入射，由于避免了激光与基体的直接接触，损伤基体的可能性大大降低，且清洗效果不依赖于表面污物及基体对激光的吸收率，可用于清洗低吸收率的材料，但该方法局限于平面清洗<sup>[8]</sup>。

#### 3.3 湿式激光清洗

##### 3.3.1 清洗机理

与干式激光清洗相比，湿式激光清洗增加了因液体表面张力引起的颗粒去除阻力。激光直接加热液体或基体吸收激光能量后再传热给液体，液体温度急速上升而发生超急速爆发沸腾，大量气泡成核并急剧长大挤压液体产生压力波，为颗粒脱离提供了强大动力。清洗力的大小还没有准确的研究。

湿式激光清洗有基体强吸收、基底与液膜共同吸收、液膜强吸收三种，实验证明后面两种的清洗效果都低于第一种。在基底强吸收的情况下，液体膜层对激光的吸收远小于基底对激光的吸收，对于在脉冲宽度 10 ns 左右的激光清洗，相应的热扩散长度在基底中约为 1 μm，在水膜中约为 0.1 μm，两者差别较大。由于脉冲激光大量被基底材料吸收，产生的热扩散长度大，从而在液体与基底交界面上会积聚大量的有待散发的能量，这些能量足以使覆盖于基底交界面的液膜产生过热和爆炸性蒸发。图 2 为基底强吸收的激光蒸气式清洗的动力学过程示意。

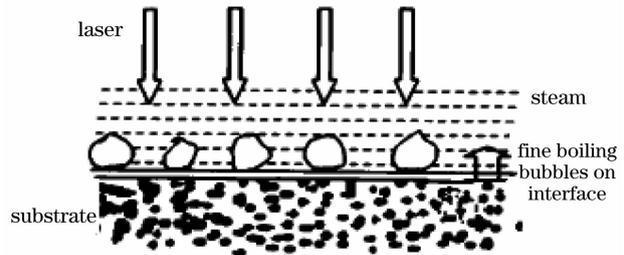


图 2 基底强吸收湿式激光清洗的动力学示意图

Fig. 2 Dynamic model of wet laser cleaning, whose substrate absorbs the laser strongly

### 3.3.2 影响因素及规律

#### 1) 激光参数的影响

i) 激光波长影响基体、液体层对激光的吸收率,从而影响清洗效果。

ii) 激光脉冲宽度影响热在基体及液体中的扩散长度,从而影响清洗效果。脉冲宽度越短,热扩散长度越短,液体与基体界面处的液体层过热程度增加,可获得更大的清洗力,但脉冲宽度过短,会损伤基体表面。一般认为,纳秒激光效果最好,微秒次之,毫秒激光则基本没有清洗效果。

iii) 激光能量密度影响基体或液体吸收的能量,从而影响清洗率。液膜激光清洗同样存在清洗与损伤阈值。

#### 2) 液体物性的影响

液体的物性影响颗粒的去除效果,目前研究的液体主要有水、甲醇、乙醇、异丙醇等,它们的颗粒去除阈值和去除效率的具体值不同,但影响规律相似。水的效果好于乙醇,但水的表面张力较大,水不容易浸润基体表面,难以形成连续的液膜层。一般采用水和 10%~20% 的甲醇、乙醇或异丙醇溶液可以获

得更好的清洗效果,加入甲醇、乙醇或异丙醇主要是为增加基体表面的湿润度,以便在基体表面形成连续均匀的液膜层。

#### 3) 颗粒材料、尺寸的影响

对不同的材料、尺寸的颗粒,若激光参数、液体性质相同或相近,液膜激光清洗具有统一的清洗阈值,该值对应于液体开始爆发沸腾需要的能量密度,与液体气泡成核长大等性质有关,与颗粒的材料及尺寸关系不大。

## 4 清洗效果评价

目前,激光清洗的评价体系还不完善,大连理工大学王续跃等<sup>[9]</sup>借助 Matlab 图像处理工具箱,对清洗前后硅片表面光学显微镜照片进行处理,编写硅片表面干式激光清洗率的评价程序,统计清洗前后硅片表面评价区域的污染颗粒个数,对清洗效果进行定量评价,图 3 为清洗率评价流程图。研究结果表明,利用此方法统计的颗粒数准确度达 97.6%,得到的激光清洗率准确度 99.2%,因此借助图像处理技术评定清洗效果是一种高效、快速、准确的新方法。

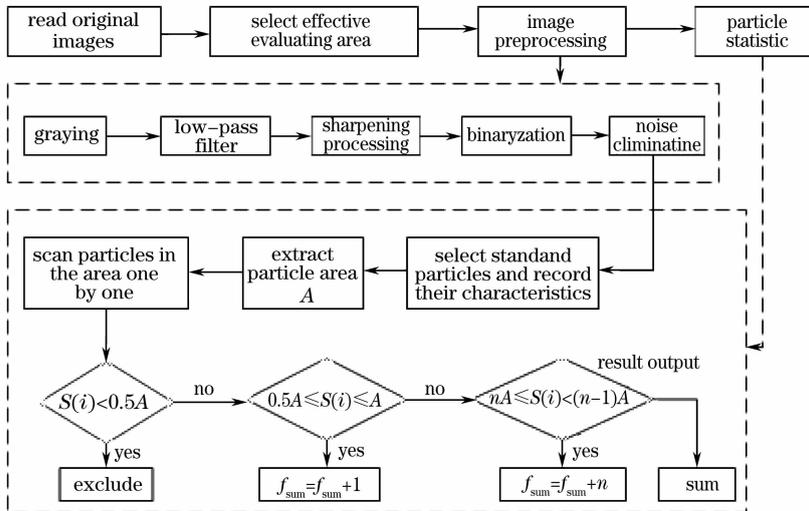


图 3 清洗率评价程序流程图

Fig. 3 Flow chart of evaluating program for laser cleaning efficiency

## 5 应 用

目前激光清洗应用较为广泛,从集成电路到光学器件,如半导体、微电子、微型机械、精密光学系统等中微米、亚微米级细微颗粒的去除;从无机(石头,大理石等)到有机(纸,羊皮纸等),如去除木质表面的石灰、泥浆、颜色、裱糊残渣和不洁物等而不伤害

原木质上的有色纤维,对石头制品残渣及膜状物进行去除使空洞露出,去除黄铜表面的锈蚀使其露出光泽,去除纸制品上的脏物以及霉菌等。如图 4 为激光清洗光栅的照片,图 5 是用激光清洗羊皮纸上的污物而不破坏墨汁的例子<sup>[10~12]</sup>。

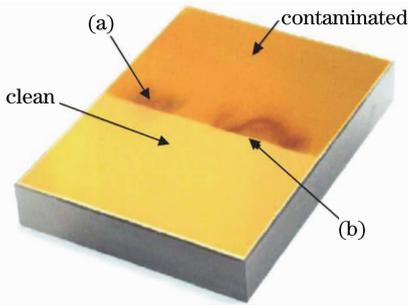


图 4 清洗后的光栅照片

Fig. 4 Photo of the grating after the cleaning procedure

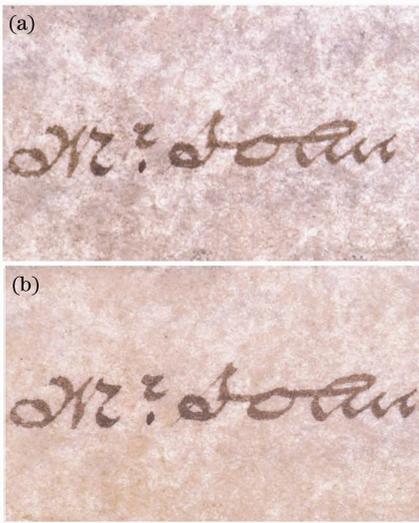


图 5 18 世纪末有墨迹的羊皮纸(35 mm 宽)。(a) 清洗前;(b)清洗后

Fig.5 Iron gall ink script on late eighteenth century parchment (area is 35 mm wide). (a) before cleaning; (b) after cleaning

## 6 前 景

由于激光清洗具备无机械接触,可以准确定位,对欲清洗对象具有可选择性,对环境无污染,对人安全,能有效清除微米级及更小尺寸的污染微粒,激光清洗效率高,节省时间等优点,已成为传统清洗方法的补充和延伸,有着广阔的应用前景。但由于激光清

洗机理复杂,影响因素众多,清洗效果不稳定。目前,国内外对其机理的研究还很不深入,而我国在这方面的研究才刚刚起步,还有待于进一步深入的研究。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Ping, Bian Baomin, Li Zhenhua. Ejecting removal of particles in laser-induced plasma shockwave cleaning[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(10): 1451~1455  
张 平, 卞保民, 李振华. 激光等离子体冲击波清洗中的颗粒弹出移除[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1451~1455
- 2 K. G. Watkins, Carmel Curran, Jong-Myung Lee. Two new mechanisms for laser cleaning using Nd: YAG sources[J]. *J. Cultural Heritage*, 2003, **4**(1): 59~64
- 3 Alberto Barone, Francesco Bloisi, Luciano Vicari. "Verso" laser cleaning of mechanically thin films[J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2003, **208~209**: 468~473
- 4 X. L. Zhou, W. Wen, J. S. Zhang *et al.*. A mathematical model of the removal of gold thin film on polymer surface by laser ablation[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, **190**(2~3): 260~263
- 5 M. P. Mateo, G. Nicolas, V. Piñon *et al.*. Laser cleaning of prestige tanker oil spill on coastal rocks controlled by spectrochemical analysis[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, **524**(1~2): 27~32
- 6 Marta Jankowska, Gerard Sliwinski. Acoustic monitoring for the laser cleaning of sandstone[J]. *J. Cultural Heritage*, 2003, **4**(1): 65~71
- 7 W. D. Song, M. H. Hong, H. L. Koh *et al.*. Laser-induced removal of plate-like particles from solid surface[J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2002, **186**(1): 69~74
- 8 T. Kim, J. M. Lee, S. H. Cho *et al.*. Acoustic emission monitoring during laser shock cleaning of silicon wafers[J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2005, **43**(9): 1010~1020
- 9 Wang Xuyue, Xu Weixing, Sima Yuan *et al.*. Evaluation of efficiency for silicon wafer cleaning by image processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(8): 1263~1268  
王续跃, 许卫星, 司马媛 等. 利用图像处理技术评价硅片表面洗率[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(8): 1263~1268
- 10 Samantha Sportuna, Martin Cooper, Ann Stewart *et al.*. An investigation into the effect of wavelength in the laser cleaning of parchment[J]. *J. Cultural Heritage*, 2000, **1**(1): 225~232
- 11 Zhang Jie, Andrew J. Birnbaum *et al.*. Effect of fluence on the discoloration of marble cleaned with UV lasers[J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2007, **253**(6): 3083~3092
- 12 E. Gubbini, G. Kommol, M. Schnurer *et al.*. "On-line" cleaning of optical components in a multi-TW-Ti: Sa laser system[J]. *Vacuum*, 2004, **76**(1): 45~49