

激光清洁技术及其应用

陈 林, 杨永强

(华南理工大学 机械工程学院, 广东 广州 510641)

摘 要:介绍了一种新型材料加工技术——激光清洁技术。对其优点、作用机理和分类都进行了详细阐述,并分析了激光功率密度、脉冲数量、入射角和波长等因素对其清洁效果的影响。此外,还介绍了激光清洁的应用实例,结果表明:激光清洁的效果令人满意。

关键词:激光加工技术; 激光清洁; 爆发性蒸发; 基体; 微粒

中图分类号: TN24 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-2276(2004)03-0274-04

Laser cleaning technology and its applications

CHEN Lin, YANG Yong-qiang

(School of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: A new material processing technology of laser cleaning is introduced. Its merit, mechanisms and types are all elaborated, the influence of laser power density, pulse number, incident angle and wavelength are also analyzed. Furthermore, some application examples of laser cleaning are introduced, and the results indicate that the cleaning effect is satisfying.

Key words: Laser processing technology; Laser cleaning; Explosive evaporation; Substrate; Particle

0 引 言

随着半导体和微电子器件向高密度、小尺寸方向发展,污染控制成为工业领域内最关键的问题之一。传统的清洁方法都具有各自的局限性:超声波不能有效地清除纳米级微粒;机械清洁不能避免对基体造成的损伤,而且劳动强度大,噪声污染严重;化学清洁则常常会引入有毒的化学物质,而且获得的清洁度也很有限。研究表明:当微粒尺寸($\leq 0.5 \mu\text{m}$)减小时,将其从基体表面清除所需要的力迅速变大,用常规的清

洁方法将很难获得满意的清洁效果。因此,有必要开发一种新型的清洁技术来满足工业生产的需要,于是,激光清洁技术应运而生。

激光清洁技术具有如下优点:清洁过程中不使用化学试剂,因此不会造成环境污染;无机械接触,降低了损伤基体的可能性,可处理不坚固表面和风化表面^[1];可控性好,允许选区清洁,可遥控清洁常规清洁技术难以到达或危险的地方,与计算机技术集成可以实现清洁过程的自动化。

激光清洁既可以用于清洁半导体和微电子器件,也可以用于清洁钢铁、铜、玻璃、陶瓷和硅片等材料。

收稿日期:2003-08-26; 修订日期:2003-10-17

作者简介:陈林(1978-),男,湖北神龙架人,工学硕士,研究方向为材料加工工艺及其自动化。

当然,其应用范围不仅仅局限于工业领域,在文物保护、建筑翻新方面,也取得了令人满意的效果^[2,3]。

1 激光清洁技术机理及分类

1.1 激光清洁技术的机理

激光清洁的机理主要有以下几种:

(1) 热冲击

干表面上尺寸小于 50 μm 的微粒和表面之间的粘接力主要是范德华力,在有一定变形的基体表面上,一个球形微粒所受到的粘接力^[4]为:

$$F_a = hr_1/8\pi Z^2 + hr_2^2/8\pi Z^3 \quad (1)$$

式中 h 为与材料无关的范德华力常数; r_1 为微粒的半径; r_2 为粘接面的半径; Z 为粘接面上基体和微粒的原子比。由上述公式可以计算出基体与微粒之间的粘接力。

从基体表面去除微粒的清洁力主要是热弹性力。它是由于基体表面和微粒吸收激光辐照能量,导致微粒和基体发生迅速的热膨胀而产生的^[5]。假设激光照射时绝大部分能量均被界面有效地吸收,根据以下几个公式可以依次算出界面的温度变化 ΔT 、热膨胀 Δl 、界面的加速度 a 和界面受到的热弹性力 F 。

$$\Delta T = (1 - R)I/\rho c\delta \quad (2)$$

$$\Delta l = \alpha\delta\Delta T \quad (3)$$

$$a = \Delta l/t_p^2 \quad (4)$$

$$F = ma \quad (5)$$

式中 R 为反射率; I 为激光的能量密度; ρ 为密度; c 为比热容; δ 为激光脉冲期间的热扩散长度; α 为热膨胀系数; t_p 为激光脉冲宽度; m 为基体表面微粒的质量。若 $F > F_a$,微粒就从基体表面被清除。

(2) 热消融

这一机理建立在表面污染物和基体对激光的吸收系数显著不同的基础之上。在此,有 3 个激光参数需要考虑:

1) 激光的波长

为确保清洁有效,污染物对激光应该有大的吸收系数、低反射率和小透射率。大多数污染物都是有机物,能强烈地吸收中长波红外线和紫外线。因此,CO₂ 激光和准分子激光是最佳选择。

2) 脉冲宽度

为了迅速地清除污染物而又不对基体表面造成损伤,使用短脉冲激光是很必要的。脉冲宽度短而能量高,使污染物瞬间被光热分解或光化学分解。在此情况下,热传导是不重要的,基体不会受到有害的影响。

3) 激光能量密度

激光的能量密度必须控制在污染物的损伤阈值和基体的损伤阈值之间。当一次激光扫描不能达到预期的清洁效果时,可以通过多次扫描来实现。

(3) 光压

由于光子具有能量,激光辐照基体表面时,会对微粒产生光压,使微粒的势能增加,势能转化为动能,获得足够动能的微粒就会从基体表面喷射出去。由于光压很小,仅靠这一机理很难获得令人满意的清洁效果。

1.2 激光清洁技术的分类

根据清洁时是否有液体能量传输介质存在,可以把激光清洁分为“干式”激光清洁和“蒸汽”激光清洁。蒸汽激光清洁就是先在基体表面沉积一层液体薄膜,然后再用短波激光辐照基体表面,微粒和基体表面对激光能量的吸收使系统的温度迅速升高,导致液体薄膜的爆发性蒸发,大量气泡在界面形成,产生足够大的力将污染物从基体表面弹出。在蒸汽激光清洁的过程中虽然引入了液体,但是它并不是“湿”清洁过程,因为液体很快就被蒸发了。使液体薄膜爆发性蒸发所需要的能量远远低于使基体熔化或蒸发所需的能量。干式激光清洁能有效地清除有机膜,而蒸汽激光清洁不仅可以有效地清除有机膜,而且能有效地清除微粒。

从理论上讲,激光清洁可以清除任何类型的表面污染物,典型的清洁操作应该综合蒸汽激光清洁和干式激光清洁,以合理利用每种清洁机理。为获得最佳清洁效果,循环清洁是必要的。一般来说,要循环清洁 n_1 次(每个循环包括 n_2 次干式清洁和 n_3 次蒸汽清洁)。 n_1, n_2, n_3 取决于试样的表面状况、污染物的类型、表面污染的程度以及想要达到的清洁程度。通常 n_1 为 1 或 2, n_2 和 n_3 从 1~4 中选择。

2 影响激光清洁效果的因素

影响激光清洁效果最重要的因素是激光的功率

密度。在进行激光清洁时,功率密度应该在一定范围内选取,其上限为基体的损伤阈值,下限为污染物的损伤阈值。在此范围内,随着功率密度的增大,清洁效果增强,如同时增加脉冲的数量,则清洁效果将会得到进一步提高。影响清洁效果的另一个重要因素是激光束的入射角。垂直入射时,微粒正下方的表面被遮住,不能接受激光的直接照射,而斜角入射时,激光束可直接照射微粒的正下方,恰在微粒和基体的界面处发挥作用,清洁效率比直射时提高了很多,而且对基体的损伤大大降低,甚至没有损伤^[5]。激光的波长也是影响清洁效果的一个因素,一般说来,激光的波长越短,清洁效果越好。这是因为在短波范围内,由于基体和污染物吸收了较多的辐射能量而经历较大的热膨胀^[5]。

3 激光清洁系统的组成及激光器的选择

一套激光清洁系统(见图 1)应该包括一台激光器,光束传输系统,液体膜沉积系统和工作台。激光器是最重要的组成部分,是激光加工的能量来源。光

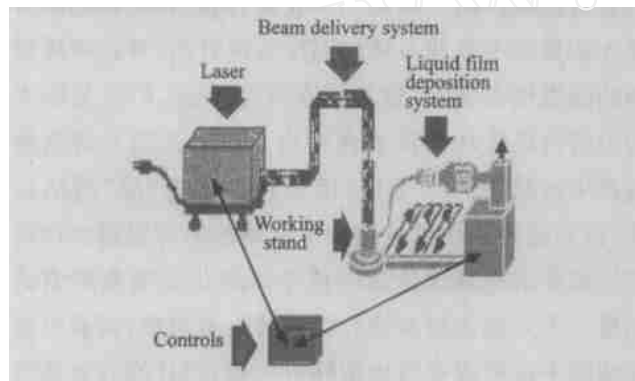


图 1 激光清洁系统示意图

Fig. 1 Sketch of laser cleaning system

束传输系统将激光束的空间形状变得均匀,然后以适当的尺寸聚焦于预期的位置,并对待清洁表面进行扫描。蒸汽激光清洁时,液体膜沉积系统是必不可少的,其作用是在基体表面沉积一层液体薄膜。工作台则用来支撑工件,并在加工过程中根据需要移动工件。

激光器的主要选择依据是清洁效果,然而,为了使激光清洁技术适应生产环境,还要考虑成本、生产能力、可靠性、安全性和实用性等因素。工业中广泛使用的大功率脉冲激光器主要有 Nd:YAG 激光器、准分子激光器和 CO₂ 激光器。Nd:YAG 激光器激光输

出功率大、机械性能好、尺寸小,既可按连续方式运转又可按脉冲方式运转,适合选区清洁和对清洁速度要求较高的场合。准分子激光光束尺寸大,具有很强的脉冲能量和光子能量,重复频度高、脉冲宽度窄,适用于清洁面积较大、清洁机理主要为光化学分解以及对清洁速度要求较高的场合。CO₂ 激光器输出的激光具有良好的单色性、方向性和相干性,但光子能量很低。红外 CO₂ 激光具有较长的光学穿透长度,可能在基体内部较深的地方产生热负荷。但在清洁对紫外光透明的材料时,CO₂ 激光是很有用的。在实际生产中,可根据需要选择适当的激光器。

4 激光清洁技术的应用实例

激光清洁技术独特的优点和技术特性引起了越来越多不同国家机构的重视,并投入人力、物力对其作进一步的研究和探索。

葡萄牙的 P. Neves 和 M. Arronte1 等人^[6]用 KrF 准分子激光器对表面有 Au、Cu 和 W 微粒污染的单晶硅晶片进行干式激光清洁和蒸汽激光清洁。结果发现:蒸汽激光清洁的效果更为显著,效率可达 100%。

华中科技大学的王泽敏等人^[7]采用 HGM-50 Q 开关 Nd:YAG 脉冲激光器清洁厚为 1 mm 的硬铝轮胎印字模具表面的橡胶层,激光入射方向与工件表面垂直,扫描速度为 300 mm/s,当激光束的能量密度达到 25.1 J/cm² 时,实现了模具表面橡胶层的完全清洗,清洁率达到 100%,而模具基材完好无损。

罗红心,程兆谷等人^[8]用额定功率为 5000 W 的横流 CO₂ 激光器对厚度为 1 mm 的 2024 铝合金去漆,激光的输出功率为 800 W,作用于漆层表面的功率密度约为 30 W/mm²,扫描速度为 400 mm/min。实验结果表明:经激光扫描一次之后,铝合金表面漆层完全剥落,而漆层以下的基体几乎不受影响。

新加坡国立大学的 Y. F. Lu, W. D. Song 等人^[9]用 KrF 准分子激光器对不锈钢进行激光清洁。实验结果表明:当激光能量密度较高、激光脉冲数目较大时,能更有效地从不锈钢表面清除污染物。据报道^[10],俄罗斯研究开发了激光除锈新技术:用直径为 12 mm 的激光束在金属表面扫描,所到之处锈斑很快就被蒸发掉。激光清洁还能改变金属微米厚表层的结构,如同覆盖了保护层,有利于防止锈斑生成,即使

是露天放置的金属构件,用激光清洁后也可以减少刷漆次数。

5 结束语

激光清洁是一种快速高效的新型激光加工技术,在实际生活中的应用已表现出良好的清洁效果,对它的研究和探索将进一步促进其发展、增强实用性、拓宽应用范围。但目前设备的高成本和对精密控制的要求在一定程度上限制了它的应用。随着激光器生产技术的不断改进和价格的降低以及人们对激光加工技术研究的日益深入,激光清洁必将在未来的工业发展中发挥日益重要的作用。

参考文献:

- [1] 刘文清,吴兴无,郭强,等. 激光表面清洁的实验研究[J]. 量子电子学,1996,13(3):265-270.
- [2] Andrew Naylor. Conservation of the eighteenth century lead statue of George II and the role of laser cleaning[J]. Journal of Cultural Heritage, 2000,1:145-149.
- [3] John F Asmus. Non-divestment laser applications in art conservation[J]. Journal of Cultural Heritage, 2003,4:289-293.
- [4] Lee J M, Watkins K G, Steen W M. Angular laser cleaning for effective removal of particles from a solid surface[J]. Appl Phys, 2000,A71:671-674.
- [5] 张魁武. 激光清洗技术评述[J]. 应用激光,2002,22(2):264-268.
- [6] Neves P, Arronte M, Vilar R, et al. KrF excimer laser dry and steam cleaning of silicon surfaces with metallic particulate contaminants[J]. Appl Phys, 2002,A74:191-199.
- [7] 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] 罗红心,程兆谷. 大功率连续 CO₂ 激光器用于飞机激光去漆[J]. 激光杂志,2002,23(6):52-53.
- [9] Lu Y E, Song W D, Hong M H. Mechanism of and method to avoid discoloration of stainless steel surfaces in laser cleaning[J]. Appl Phys, 1997,A64:573-578.
- [10] 辛承梁,乔松,田晓燕. 激光清洗工作原理与应用[J]. 化学清洗,1998,14(6):32-34.

《红外与激光工程》征稿简则

《红外与激光工程》系中国宇航学会光电技术专业委员会会刊,由中国航天科工集团公司主管,双月刊,国内外公开发行人。本刊主要报导国内外红外与激光技术在航天、卫星和战术导弹武器系统中应用的学术论文、科研报告,各类新的光电技术实验方法和成果,新工艺、新材料等,也报导国内领先的光电技术在民用方面的最新科研成果。2002年起,本刊刊登英文稿件,欢迎广大读者踊跃来稿。

来稿要求及注意事项:

1. 来稿须论点明确,数据可靠,文字简炼,逻辑严谨,一般5000字左右为宜,凡属国家自然科学基金资助的重点科研项目,请予以注明。

2. 来稿用A4纸按标准格式打印,并留有图空,版心为174 mm × 246 mm,公式、图表中量的大小写及上、下角标须标清楚。

3. 中英文稿要有中、英文对照的摘要,中文文摘200~300字左右,英文摘要100单词为宜,中、英文关键词3~6个。按中国图书馆分类法(第四版)对来稿分类,标注中图分类号。

4. 来稿中的表、图均不超过8个。中文稿须有中、英文对照的图标及表头,图表中的文字须译成英文,或用相应的符号表示。

5. 参考文献应择最主要的列出,应是国内外公开发表的文献,按著者、文题、刊名或书名、出版地、出版者、年卷期、页码顺序列出,并参考清华光盘版检索规范加注标识码,在正文用上角标标出。

6. 文稿不应涉及保密内容及他人利益,文责自负。

7. 请勿一稿多投。文稿一旦录用,编辑部发录用通知单。录用的稿件编辑部有权删改。来稿录用否,在3个月内通知作者。

8. 文稿一经发表,按规定支付稿酬,并赠送本刊物两本。

来稿请寄天津225信箱32分箱《红外与激光工程》编辑部收,邮编300192。欢迎使用电子邮件投稿,Email: irla@vip.sina.com。