

激光器工程化与清洗应用中的技术突破 (特邀)

刘丽飒¹, 林学春^{2*}, 宋峰^{1*}

- (1. 南开大学物理科学学院, 天津 300071;
2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100089)

摘要: 文中介绍了千瓦级准连续全固态激光清洗样机研发的关键技术。激光清洗工程样机配合三维龙门运动平台形成激光清洗工业平台。简介针对钢轨表面除锈和飞机复合材料蒙皮除漆的激光清洗机制模型, 从样品识别、过程监测、结果检测三方面介绍激光清洗监控方法。对 60 钢轨激光除锈和飞机铝制蒙皮进行除漆, 笔者课题组获得了激光清洗的最佳工艺参数, 清洗效率指标通过专家测试。

关键词: 激光清洗; 工程化; 千瓦级准连续全固态激光器; 钢轨除锈; 飞机蒙皮除漆

中图分类号: TH744.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230049

The technical breakthroughs of kilowatt laser and laser cleaning in engineering application (*invited*)

Liu Lisa¹, Lin Xuechun^{2*}, Song Feng^{1*}

- (1. School of Physical, Nankai University, Tianjin 300071, China;
2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100089, China)

Abstract: This paper introduces the main task of the fifth sub-topic project "Key Technologies in Laser Engineering and Cleaning Application" of the National Key Research and Development Project of the Ministry of Science and Technology (2017YFB0405100) from 2017 to 2021: the key technologies of quasi-continuous all-solid-state kilowatt level laser cleaner prototype. Laser cleaner prototype with three-dimensional large gantry frame forms laser cleaning industrial platform. A laser cleaning mechanism model for rail surface rust removal and aircraft composite skin paint removal is introduced. The methods of laser cleaning monitoring are introduced from sample identification, process monitoring and result detection. The laser cleaning parameters of 60 rail rust removal and aircraft aluminum skin depainting are obtained by author's research group, and the cleaning efficiency index passes the expert test. During the implementation of the project, developed prototypes are applied to more than 10 units such as China National Petroleum Corporation, Harbin Institute of Technology, Academy of Armored Force Engineering, Lianbo Heyi Technology Co., LTD. At the end of project execution, the project is awarded as the outstanding project of the key R&D plan of the Ministry of Science and Technology.

Key words: laser cleaning; engineering; quasi-continuous all-solid-state kilowatt level laser; rail rust removal; aircraft skin depainting

收稿日期: 2023-01-19; 修订日期: 2023-02-03

基金项目: 科技部国家重点研发计划 (2017YFB0405105, 2022YFB4601502)

作者简介: 刘丽飒, 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光与光电子技术、纳米发光材料与技术。

通讯作者: 林学春, 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为激光与光电子技术。

宋峰, 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光与光电子技术、纳米发光材料与技术。

0 引言

文中介绍 2017~2021 年科技部国家重点研发计划“战略性先进电子材料”重点专项“千瓦级准连续全固态激光材料与器件关键技术 (2017YFB0405100)”项目的第五课题“激光器工程化与清洗应用中的关键技术 (2017YFB0405105) 完成的主要任务。参与研究的有南开大学、中国科学院半导体研究所、东方镭射科技有限公司和中国人民解放军空军航空维修技术学院四家单位。

首先介绍激光器清洗工程化样机的研发过程与攻克的几项主要技术难点。然后针对钢轨除锈和飞机复合蒙皮除漆的激光清洗机制模型进行介绍。从样品识别、过程监测、结果检测三方面介绍激光清洗监控方法。最后对 60 钢轨激光除锈、飞机铝制蒙皮光除漆以及飞机复合材料蒙皮光漆的工艺探究过程和测试结果进行介绍。

1 激光清洗工程化样机研究

高平均功率、高峰值功率、高重复频率、纳秒脉冲宽度的全固态激光器是激光清洗的首选激光光源之一。笔者课题组在已有国家科技成果等技术^[1-2]基础上研发的千瓦级准连续全固态激光器工程样机采用平-平谐振腔, 808 nm 半导体激光侧面泵浦单棒 Nd:YAG, 离子掺杂 4%, 双声光 Q 垂直正交放置, 通过多级放大实现了大于 1000 W 的准连续脉冲激光长期稳定输出, 连续 100 h 拷机, 功率不稳定性优于 $\pm 1.38\%$ 。工程应用中激光器功率稳定性是重要的技术指标, 其关键技术包括: 半导体激光泵浦模块可靠性及振荡器高功率关断技术; 高峰值功率激光光纤耦合技术; 激光器系统冷却、密封、湿度控制、状态监测技术; 激光清洗头设计与轻量化技术。

关于激光模块光束质量控制技术, 课题组发明了一种软边光阑腔镜的模式控制谐振腔, 通过在腔镜上制备微米级边缘毛化结构实现模式约束, 形成软边光阑。通过控制软边光阑的尺寸, 限制中功率段的有效增益区, 将光场能量约束在小的模体积内振荡。有效抑制了中功率段的高阶模起振, 实现了种子源在全功率段高光束的质量运转。对振荡放大技术进行了改进, 将声光 Q 开关内部光学晶体入射面设计成凹型曲面, 增加了穿过振荡光束的光栅数, 提高了声光 Q 开关关断振荡的能力, 将传统的“一振三放”激光器结构改进为“一振两放”, 简化了光路结构, 提高了系统的可靠性。为了保证激光器在不同环境下的正常工作, 增加了激光模块内水路结冰监控及预加热功能设计, 减小冷却水水温波动。开发了有返回光监测功能的光纤输出端头, 缓解了激光加工时返回的激光束烧坏光纤激光器泵浦源的现象。在腔内除湿方面, 提出压缩空气除湿方法, 增加一组 SMC 三级压缩空气过滤, 确保进入激光腔内的空气洁净度, 实现了腔内除湿目的。整机配有稳压电源, 激光器控制系统监测水冷机工作信号, 确保了激光器的安全稳定运行。

激光清洗加工头是激光清洗机的核心部件之一, 课题组对其先后进行了六代更替, 如图 1 所示。第一代激光清洗头主体外壳为金属材质, 体积较大, 质量~10 kg, 不宜手持。第二~第五代激光清洗加工头不断减少体积, 减重到 2 kg; 面板增加了扫描速度与扫描宽度的调节按钮与显示; 增加了电路板水冷与防静电处理, 避免过热引起的电气故障; 对吸尘通道与压缩空气流道进行设计, 大幅降低了工作场所粉尘污染风险; 将振镜控制与激光器控制集成; 优化了信号线、水管、气管布局, 避免接头松动; 优化光纤输入端固定方式, 避免光纤摆动导致的光纤损坏; 手持开关

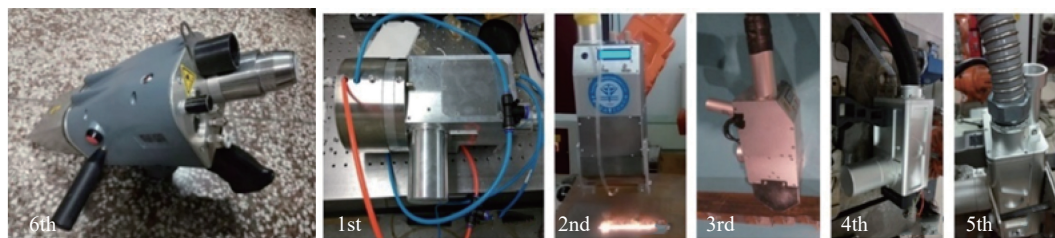


图 1 六代激光清洗头

Fig.1 Six generation laser cleaning heads

控制激光与振镜启停。第六代激光清洗头,采用 3D 打印方式研制流线型外观,增加辅助照明光源,大幅提升了工业应用的舒适性。

课题组基于龙门框架结构搭建了计算机控制的快速三维激光清洗移动平台,如图 2 所示。可实现快速、稳定的自动化激光除漆、除锈。

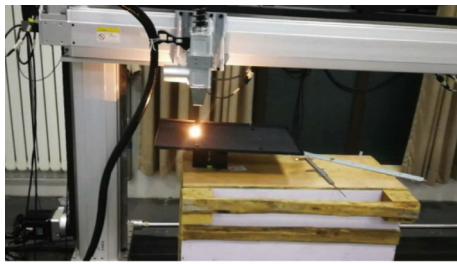


图 2 三维大行程激光清洗实验平台整机照片

Fig.2 Photo of the laser cleaning experimental platform with three dimensions of large travel

2 激光清洗理论模型与监控方法

针对钢轨除锈,在已有研究基础^[3]上提出了激光除锈四层模型,如图 3 所示。第一、二、三层都是锈层,第四层是钢铁基层层。一、二层为脉冲激光在锈层中的热扩散引起的热影响区,它们之间的分界线是锈层分解温度的等值线,第三层为热未影响区。随着一层、二层的逐渐去除,三层的厚度逐渐降低,存在一个特定厚度的剩余锈层,这时透过锈层的激光能量部分已经达到激光清洗浮锈层的清洗阈值。将第一、二层称为单脉冲热影响区,这个区域随脉冲激光的逐层烧蚀在向下逐渐推移,即热影响区与未影响区的分界线是在逐渐下移的。

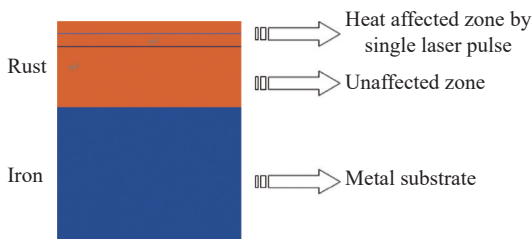


图 3 针对激光钢轨除锈的四层模型

Fig.3 Four-layer model for laser rail derusting

激光清除飞机铝合金蒙皮表层油漆理论模型研究比较成熟^[4-5]。课题组主要针对飞机碳纤维复合材

料(CFRP)蒙皮除漆时出现的激光作用时容易造成基底损伤的问题,建立了表面附加水层与缓冲层的间接激光清洗模型,如图 4 所示。当激光作用于缓冲层时,温度分布根据激光的穿透深度,从最高点往两侧衰减。根据不同的热分解温度需求,调控温度变化,从而让目标物体达到所需要的热分解温度,完成相应的清洗过程。

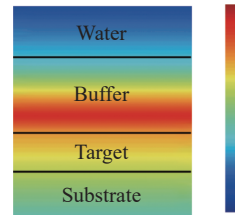


图 4 针对飞机复合蒙皮除漆的间接激光清洗模型

Fig.4 Indirect laser cleaning model for aircraft composite skin paint removal

依据上述模型,通过数值模拟,确定了铁质基底表面锈蚀、飞机表面蒙皮的去除阈值以及合适的激光去除参数;预测了激光清洗过程中激光对于基底的影响,从而确定是否会对基底造成损害。

激光清洗过程中,激光与物质发生强烈的相互作用,产生了各种物理化学反应。激光清洗工程化应用需要对这个过程进行有效的实时监测与评估^[6-9]。课题组从样品识别、过程监测、结果检测三方面对于激光清洗监测进行了研究。

样品识别通过图像处理来进行,具体分为三步:采集图像、背景样品分割、分析样品图像特征。过程监测通过温度监测和声波监测两种方式可进行实时监测。温度监测是在清洗过程中实时监测温度,从而判断其反应,调控激光清洗过程;声波监测基于光声效应,不同的声波信号包含了不同的信息,可用于判断清洗物品的污染程度和判断清洗的阶段。清洗结果检测主要通过表面形貌、成分分析和物化性质三个方面来进行。表面形貌可使用三维轮廓仪、扫描电镜拍摄,观察其表面状态判断其清洗结果,也可根据其粗糙度进行质量判断;成分分析是利用场发射扫描电镜、激光诱导击穿光谱装置等检测表面元素及其分布,将结果与标准结果进行对比;物化性质可使用显微硬度计或微维氏硬度计测显微硬度,使用材料高温性能测试机测抗拉强度,使用恒电位器进行电化学极

化测试,分析其耐腐蚀特性。将各项测试结果与标准对比进行清洗质量分析。

3 激光清洗工艺研究与效果测试

课题组针对 60 钢轨激光除锈、激光去除铝基底飞机蒙皮表面油漆和复合材料飞机蒙皮表面油漆进行了的工艺研究与清洗效率测试。

对于特定的基底材料,需要有针对性的研究激光除锈的最佳工艺参数^[10-12]。以碳钢基底的钢板材料表面锈蚀为: FeOOH 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeO} \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 的混合产物。在去铁质基底表面的疏松多孔的铁锈时,在铁质基底表面生成一层均匀的、厚度非常小的、胞状枝形结构 (cellular dendritic structure), 在清洗过程中出现的黄化、黑化以及蓝化现象,不利于钢轨的焊接操作。为此课题组经过分析并反复实验,确定了包括光斑直径、焦距、脉宽、激光重复频率、振镜扫描频率、扫描幅宽、激光输出功率等多项工艺参数,并加入惰性气体抑制等离子焰高度。最终,可完全清除 60 钢轨成锈模式中的所有锈斑,且钢轨表面无蓝化现象,除锈速率 8 根/h。

6001 铝合金基底飞机蒙皮的油漆为三层结构: 第一层彩色漆为醇酸漆、第二层白色漆为聚氨酯漆、第三层为防锈底漆。每种漆的激光去除阈值不同。通过研究激光清洗后残余漆层表面形貌、激光热烧蚀和激光热膨胀对再涂覆的附着力影响,在课题组已有研究的基础上^[13],确定了激光分层清洗方案^[14]。经过理论模拟和实验研究,确定了激光器输出功率、重复频率、脉宽、扫描激光光斑直径、场镜焦距、二维激光扫描头扫描幅宽、振镜扫描频率以及大行程激光扫描清洗装备行进速率等多项工艺参数^[15]。对涂有厚度 55~60 μm 的三层面漆 (醇酸漆、聚氨酯漆、防锈底漆) 的 1.2 mm 铝合金 (6061) 蒙皮,激光一次性除漆速率为 2.2 m^2/h 。

飞机 CFRP 蒙皮上防护涂层多采用多组份聚合物材料,其本质上是由粘合剂、颜料和溶剂按一定比例组成的混合物。粘合剂主要是由高分子树脂或油料等聚合物物质组成,表面涂有聚氨酯漆^[16]。针对 CFRP 蒙皮材料的激光涂层去除,课题组取得了阶段化成果,工程化应用尚在完善。

本课题于 2021 年结题。课题研究申请发明专利

13 项,发表科技论文 4 篇,培养硕士生 5 名,博士生 3 名,销售样机 10 台 (应用于用于中国石油天然气集团有限公司、哈尔滨工业大学、装甲兵工程学院、联博合益科技有限公司等十余家单位),结题时课题所在项目被评为科技部重点研发计划优秀项目。

参考文献:

- [1] 林学春,侯玮,于海娟,等. kW级高功率准连续全固态激光器关键技术[Z]. 国家科技成果, 2014
- [2] Zhang Zhiyan. Research on high peak power quasi-continuous wave laser cleaning technology and the key technology of fiber transmission [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [3] Wang Huan, Man Shijie, Liu Lisa, et al. Mechanism of derusting by laser-diode pumped acousto-optic Q-switch Nd : YAG laser [J]. *Cleaning World*, 2018, 34(5): 37-41. (in Chinese)
- [4] Miao Runpeng, Wang Tao, Yao Tao, et al. Experimental and numerical simulation analysis of laser paint removal of aluminum alloy [J]. *Journal of Laser Applications*, 2022, 34: 012002.
- [5] Guo Lingyu, Li Yuqiang, Geng Shaoning, et al. Numerical and experimental analysis for morphology evolution of 6061 aluminum alloy during nanosecond pulsed laser cleaning [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2022, 432: 128056.
- [6] Yoo H J, Baek S, Kim J H, et al. Effect of laser surface cleaning of corroded 304L stainless steel on microstructure and mechanical properties [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 16: 373-385.
- [7] Wang Jun, Yang Yuling, Qi Jinyan, et al. Thermodynamic simulation, surface morphology and bending property of carbon fiber reinforced polymer composite material subjected to laser cleaning [J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 152: 108099.
- [8] Zhang Xiao, Wang Mingdi, Liu Jincong, et al. Laser intelligent rust removal based on machine vision [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0814001. (in Chinese)
- [9] Shangguan Jianfeng, Tong Yanqun, Yuan Aihua, et al. Online detection of laser paint removal based on laser-induced breakdown spectroscopy and the K-nearest neighbor method [J]. *Journal of Laser Applications*, 2022, 34: 022009.
- [10] Wu Yonghua, Ren Xiaochen, Liu Haoxian, et al. Influences of laser parameters on the cleaning quality of carbon steel surface [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(4): 500-506. (in Chinese)
- [11] Wen Ting, Chen Hui, Wang Qian, et al. Effects of laser cleaning

- overlap rate on surface morphology and corrosion performance of 5A06 aluminum alloy [J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51(18): 98-102. (in Chinese)
- [12] Seo Youngjin, Son Seungik, Lee Dongkyoung. A study of laser cleaning to remove by-products occurring after arc welding [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 288: 126375.
- [13] Shi S D, Du P, Li W, et al. Research on paint removal with 1064 nm quasi-continuous-wave laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 0903001. (in Chinese)
- [14] Gao Kun, Zeng Quansheng, Zhang Zhiyan, et al. Adhesion of residual primer paint after laser cleaning aircraft aluminum alloy skin [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0914006. (in Chinese)
- [15] Wan Lei, Wang Yuguang, Zuo Xiaoyan, et al. Numerical simulation and experimental study on laser cleaning of 5083 aluminum alloy surface paint layer [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(6): 803-813. (in Chinese)
- [16] Chen Suming, Yue Shan, Yang Lei, et al. Laser paint removal of carbon fiber reinforced composite material [J]. *Applied Laser*, 2022, 42(4): 119-125. (in Chinese)