

大能量高重频脉冲激光智能清洗技术与装备 (特邀)

郭斌*, 徐杰, 苏轩

(哈尔滨工业大学激光制造研究中心, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘要: 高效、高质清洗是激光清洗的主要发展方向,也是实现激光清洗大规模工业应用的关键。国家重点研发计划“增材制造与激光制造”重点专项“大能量高重频脉冲激光智能清洗技术与装备”(共性关键技术类)针对航空和航天领域的装备制造和修护中,对精密、绿色、智能可控的新型清洗技术的迫切需求,解决多光束激光清洗多场耦合效应作用机制科学问题,突破大能量高重频纳秒激光器多维度增益协同调控、复杂曲面激光清洗残留物定位识别与路径规划和超宽幅面多光束联动拼接与能量控制等关键技术,开展大能量高重频纳秒脉冲激光器、激光高效高质清洗机制与关键技术和超宽幅面激光智能高效清洗成套工艺与装备研究。研究成果将在航天器表面热控涂层和飞机雷达罩表面除漆清洗去除中实现典型应用。

关键词: 激光源; 多光束激光; 清洗机制; 智能装备; 应用示范

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230073

High energy high repetition rate pulsed laser intelligent cleaning technology and equipment (*invited*)

Guo Bin*, Xu Jie, Su Xuan

(Laser Manufacturing Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: High efficiency and quality is the main focus direction within the laser cleaning area, and also the key to realize the large-scale industrial application. The National Key Research and Development Program "Additive Manufacturing and Laser Manufacturing" Key Special Project "High Energy High Repetition Rate Pulsed Laser Intelligent Cleaning Technology and Equipment" (common key technologies) aims at the urgent demand for precision, green, intelligent and controllable new cleaning technology in aerospace equipment manufacturing and repair. This project is dedicated to understanding the multi-beam laser cleaning multi-field coupling mechanism, and breaking key technologies such as cooperative control of high energy high repetition rate nanosecond laser with multi-dimensional gain, residue location identification and path planning on complex surfaces, multi-beam splicing and energy control in ultra-wide format. At the same time, the research on high energy high frequency nanosecond pulsed laser, high efficient and high quality cleaning mechanisms and key technology, and ultra-wide format cleaning process and equipment are carried out. Finally, the research results will enable some typical applications for removing thermal control coatings from spacecraft surfaces and paint from aircraft radome surfaces.

Key words: laser source; multi-beam laser; cleaning mechanism; intelligent equipment; application demonstration

收稿日期:2023-02-08; 修订日期:2023-02-15

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4601500)

通讯作者:郭斌,男,教授,博士生导师,主要从事激光清洗、塑性微成形及微纳制造方面的研究。

激光清洗是利用激光与物质相互作用去除基体表面附着物的清洗方法,具有易操作、非接触、高柔性、高效率、高质量和节能环保等特点,被誉为“21 世纪最具潜力的绿色清洗技术”,正在逐步取代传统的机械、化学清洗方法,已成为工业清洗领域的颠覆性技术。激光清洗已经列入国家中长期科技发展规划(2021-2035) 优先发展的关键技术,在航空航天、船舶海洋、轨道交通、3C 电子等领域具有重大应用需求^[1-2]。激光清洗本质是通过光学、热学、力学的交叉耦合作用,实现强光场和材料的相互共振和能量转换,随后通过热传导、非固相动力、材料的相变及再沉积完成材料的选择性去除^[3-4]。近年来,随着越来越多的科研机构和企业重视激光制造技术,激光清洗基础研究和配套设备研发等方面已经取得了显著的成果。

在激光源方面,大能量高重频纳秒激光可有效提高清洗效率,是实现激光清洗大规模工业应用的关键。清洗用高性能脉冲激光器市场长期被欧美企业垄断,比如,英国 Andritz 推出的皮秒和纳秒级高能二极管泵浦固体激光器,已经成为高功率激光表面清洗行业的主要供应商^[5]。美国 IPG 公司作为全球最大的军用/商用光纤激光器制造商,其高功率脉冲激光清洗装备在汽车轮胎模具清洗、飞机蒙皮除漆等领域占有重要市场份额^[6]。近年我国清洗用核心激光源领域中国科学院半导体研究所^[7]、武汉锐科光纤激光技术股份有限公司等在功率/能量提升技术方面不断取得突破(如图 1 所示),打破国外垄断,推进国产激光

清洗设备开始从中低功率范围到高功率迈进。

在智能化关键技术方面,美国 EWI 系统开展了基于视觉精确定位的激光智能清洗技术研究,已经为美国空军陆战队提供了系列相关激光清洗设备,用于武器装备清洗和飞机蒙皮表面油漆/涂层去除,有效提高了作战装备、航空航天等领域的制造和修护水平。德国 4 JET 研究的基于机器视觉精确定位激光清洗技术已经在轮胎模具清洗中得到应用,推动传统产业转型升级。国内在智能化关键技术方面刚刚起步,处于原理验证阶段。机器视觉的精确定位、智能选区、残留物快速识别、复杂曲面路径智能规划基础理论和原创算法薄弱。

在激光清洗装备方面,德国 Clean Laser 推出从 200~1000 W 系列激光清洗工作站,涵盖油漆、铁锈、灰尘、油污等领域。美国 Adapt 推出了最高功率达 2 000 W 的激光清洗工作站,已应用于飞机蒙皮表面的油漆清洗^[8]。国内哈尔滨工业大学在国家重点研发计划、国家自然科学基金、广东省重点研发计划等项目资助下,较早地开展了清洗专用激光器和装备技术研究,处于国内激光清洗技术研究与应用的前沿队列。已开发出最大功率 4 500 W 的自动化清洗装备,相关成果在飞机蒙皮和高铁主轴表面脱漆、航天发动机钛合金焊前/后清洗、船舶表面锈蚀和涂层清洗等方面得到应用^[9-10]。

近日,哈尔滨工业大学牵头申报的国家重点研发计划项目“大能量高重频脉冲激光智能清洗技术与装

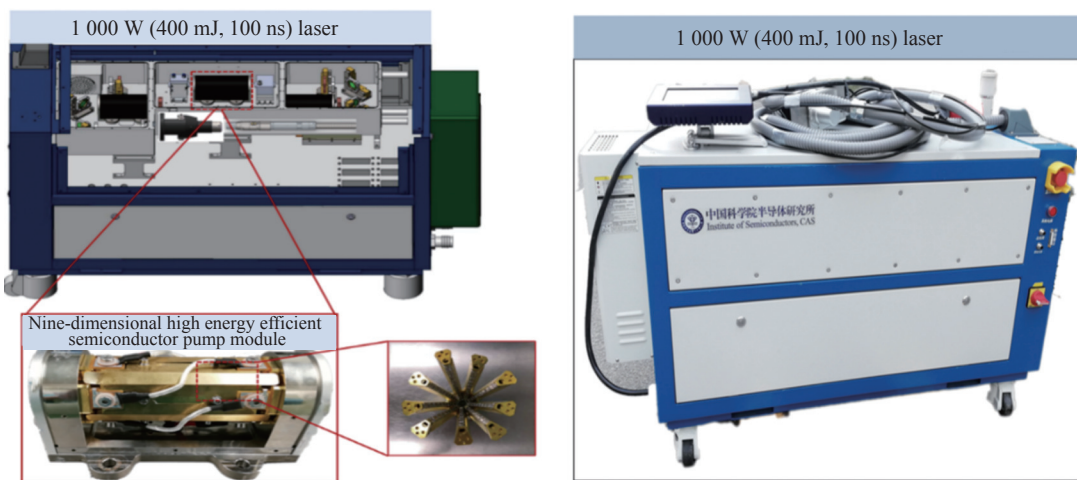


图 1 大能量高重频脉冲激光器

Fig.1 High energy high repetition rate pulsed laser

备”获批准立项。项目参与单位包括中国科学院半导体研究所、武汉金顿激光科技有限公司、哈尔滨工大焊接科技有限公司、南开大学、浙江工业大学、青云激光技术(台州)有限公司、北京卫星制造厂有限公司、中国工程物理研究院激光聚变研究中心和中国科学院力学研究所等科研单位。项目拟开展的研究内容如下:(1)在大能量高重频纳秒激光器研制方面,拟开展激光介质空间增益约束及泵浦芯片/线阵空间位置编排增益匀化研究,提高增益介质轴/径向增益分布均匀性,降低泵浦中心功率密度值,提升激光器系统(泵浦源、振荡器、放大器)整体脉冲能量的负载能力。开展基于 MOPA 结构的串联放大系统级间匹配研究,突破焦耳级大能量高重频纳秒脉冲激光稳定输出;(2)在激光高效高质清洗机制与关键技术研究方面,在激光原理、材料物理性能以及热弹性力学等理

论的指导下,通过构建三维有限元模型系统分析多场耦合作用下清洗对象的剥离行为,揭示多种光致耦合效应的作用机制。研究复杂构件清洗残留物二维映射图像识别和曲率连续多变表面特征精确配准方法,对激光清洗末端执行器进行精确的位姿调整,并提取复杂结构选区表面缺陷特征,实现空间随机多点残留物再清洗智能避障路径规划,同时反馈控制激光清洗末端执行器进行自适应修补与纠正;(3)在超宽幅面激光智能高效清洗成套工艺与装备方面,设计基于大型龙门与机器人联动连续-脉冲激光复合清洗系统,基于总线控制技术开发集运动控制系统、视觉监测系统、激光清洗系统于一体的软件系统,研制集视觉精确定位、智能选区、残留物识别和高效循环作业功能的超宽幅面激光智能清洗成套装备。研究方案如图 2 所示。

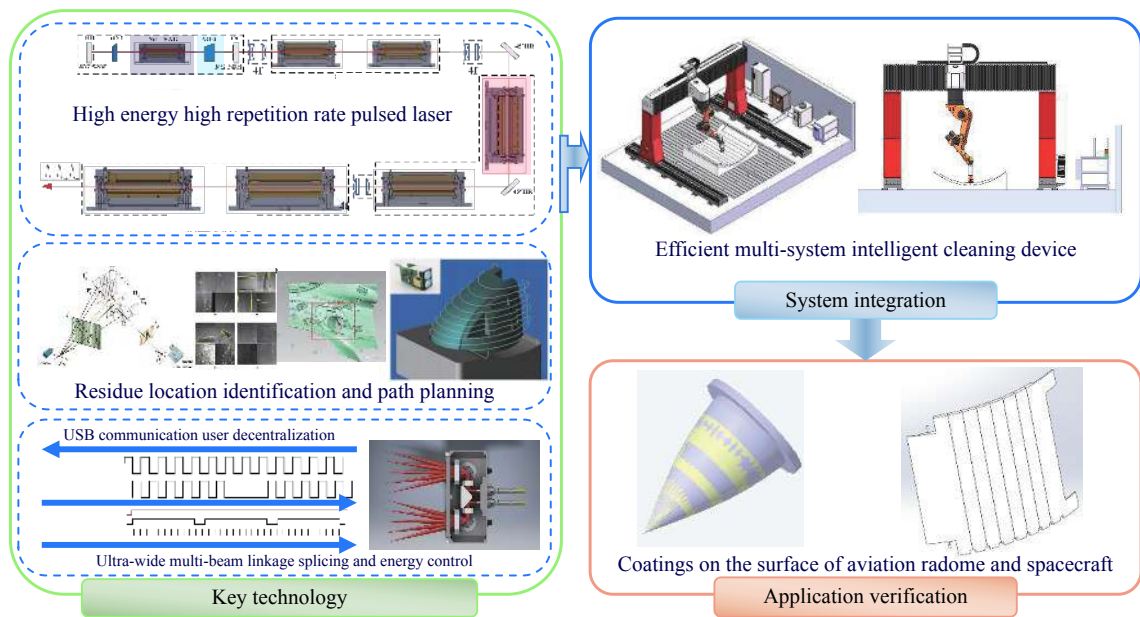


图 2 项目研究方案

Fig.2 Research proposal of the project

项目研究成果将在航天器表面热控涂层和飞机雷达罩表面除漆清洗去除中实现典型应用。项目的实施会为使用单位带来数千万乃至上亿元的直接经济效益,将对铸造大国重器、推动传统产业转型升级和战略性新兴产业发展提供高速动力。对于促进我国激光产业向自动化和智能化迈进,加快我国绿色制造技术发展和双碳目标实现具有重要意义。

参考文献:

[1] Schawlow A L. Lasers [J]. *Science*, 1965, 149(3679): 13-22.
 [2] Monette D L. Coating Removal Techniques in the Aerospace Industry[M]//Corrosion Control in the Aerospace Industry. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009: 225-247.
 [3] Zapka W, Ziemlich W. Efficient pulsed laser removal of 0.2 μm sized particles from a solid surface [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 58(20): 2217-2219.

- [4] Zhu G D, Xu Z H, Jin Y, et al. Mechanism and application of laser cleaning: A review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 157: 107130.
- [5] Metsios I, Dai D C, Chard S, et al. High pulse energy kW average power nanosecond lasers enable breakthrough in rapid coating removal[C]//High-power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, & Systems VII, 2018.
- [6] Jin S, Wang J X, Yuan X D, et al. Laser paint removal technology for aircraft metal skin and composite materials [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(17): 63-70. (in Chinese)
- [7] Wang H Y, Zhang Z Y, Yu H J, et al. Adjustable double-pulse laser output based on diffraction loss modulation of acousto-optic Q-switching [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108130.
- [8] Gan Jiahang. U. S. Navy MRO Center tests laser cleaning tech for aircraft components [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2021(5): 18. (in Chinese)
- [9] Tian Z, Lei Z L, Chen Y B, et al. Nanosecond pulsed fiber laser cleaning of natural marine micro-biofoulings from the surface of aluminum alloy [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118724.
- [10] Tian Z, Lei Z L, Chen X, et al. Evaluation of laser cleaning for defouling of marine biofilm contamination on aluminum alloys [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 499: 144060.