

激光清洗技术研究进展及挑战(特邀)

朱国栋^{1,2}, 张东赫^{2,5}, 李志超^{1,3}, 苏轩⁵, 金阳⁴, 徐杰^{1,3,5*}, 单德彬^{1,3}, 郭斌^{1,2,3,4,5}¹哈尔滨工业大学微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;²哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;³哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;⁴哈尔滨工业大学(深圳)材料科学与工程学院, 广东 深圳 518055;⁵哈尔滨工业大学激光制造研究中心, 河南 郑州 450046

摘要 开展激光高效清洗基础理论及装备的研究是对《中国制造 2025》纲要的具体落实,符合我国可持续发展战略,有利于提高航空航天、轨道交通、海洋船舶等装备的自动化程度,对于我国产业结构的升级与优化具有重要意义。尽管国外发达国家在激光清洗的基础理论、工艺探索、工程应用方面开展了大量的工作,但仍普遍存在构件清洗效率低、耦合机制不清晰、评价标准和在线监测技术有待完善等问题。针对我国航天、高铁、海洋等领域对激光清洗的重大需求,以航天新一代固液冲压发动机的 TA15 钛合金进气道、高铁车体特征件和转向架零部件、海洋船舶制造中的舱口盖等大型复杂构件为研究对象,介绍了激光清洗机制及工艺、清洗过程中多元参数的在线监测、清洗智能装备技术等方面的研究进展,以期为我国未来智能激光制造的可持续发展提供一定参考。

关键词 激光技术; 激光清洗; 清洗机制; 智能选区; 工程应用

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231196

1 引言

作为激光领域重要组成部分的激光清洗被誉为“21 世纪最具潜力绿色清洗技术”,其在大型复杂构件的高效精准清洗方面具有独特的优势^[1-2]。采用这一技术可以清洗传统技术无法处理的零件,大幅度提高产品的清洗效率和清洗可靠性。激光清洗技术在欧美已经发展了五十多年,目前已经发展得较为成熟,在油漆、铁锈、灰尘、油污等方面已实现规模化应用^[3-5]。在便携式激光清洗装备中,德国 cleanLASER 公司始终处于领先地位,产品涵盖 200~1000 W 系列可移动式激光清洗设备及工作站。意大利 El.En.S.p.A.、比利时 P-Laser、美国 Laser Photonics 公司也是著名的专业激光系统供应商。受当前全球大环境作业、人员劳动强度、操作稳定性等因素的影响,应用效果不佳,实时清洗效果评估和智能化控制有待加强。在大型构件激光清洗装备中,德国 4JET 公司的激光清洗智能装备技术较为先进成熟,美国 IPG Photonics 公司、EWI 研究所等也在航空航天、轨道交通领域中占有重要市场份额。尽管国外发达国家在激光清洗的基础理论、工艺探索、工程应用方面开展了大量的工作,但仍普遍存

在构件清洗效率低、耦合机制不清晰及评价标准和在线监测技术有待完善等问题。因此,开展激光清洗技术及装备的研究是贯彻我国“大力发展高端制造业”的政策,是对《中国制造 2025》纲要的具体落实,对于我国抢占未来经济和科技发展制高点有重要意义。

我国激光清洗技术发展较晚,基本始于 21 世纪。**图 1**展示了我国激光清洗技术及装备的发展历程。国内前十年大都采用 CO₂、Nd:YAG 激光光源进行实验室理论研究,与国外相比处于追赶阶段^[6]。南开大学、华中科技大学等机构开展激光清洗相关研究较早,主要集中在光学基片表面微粒的去除及清洗理论方面。1995 年,谭东晖等^[7-8]采用德国 EMG201MSC 准分子激光对硅片表面的油脂进行了去除试验,讨论了硅基片在 308 nm 下的清洗阈值和损伤阈值。2000 年,王泽敏等^[9]采用 YAG 脉冲激光对铝板表面的单色漆和复合色漆进行了清洗,探索了色漆厚度对清洗工艺的影响。同年,史兴宽等^[10]利用 YAG 激光对光学基片表面的镀金薄膜进行了清洗,确定了其清洗阈值和损伤阈值。2004 年开始,宋峰等^[11-14]连续发表了多篇关于激光清洗原理及应用的研究论文,系统介绍了激光清洗的基本概念、特点及应用范围。2005 年国务院明确提

收稿日期: 2023-09-12; 修回日期: 2023-10-21; 录用日期: 2023-11-06; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(U2133214, U19A2077)、国家重点研发计划(2022YFB4601500, 2017YFB1105000)、广东省重点领域研发计划(2018B090905003)

通信作者: *xjhit@hit.edu.cn

出发发展再制造^[15], 2008 年将再制造纳入法律体系^[16], 激光清洗技术得以快速发展。随后国产大功率激光器逐步涌现, 与国外基本处于并跑阶段。武汉锐科光纤激光技术股份有限公司先后研制出国内第一台单模脉冲光纤激光器和多模高能量脉冲光纤激光器产品, 成为继美国 IPG 公司之后全球第二家掌握高功率全光纤激光器核心技术的单位^[17]。山东产研强远激光科技有限公司作为北方最大的激光企业, 其研发的清洗用固体激光器、激光清洗单机已打破国外大能量固体清洗激光设备的垄断^[18]。经过二十多年的发展, 我国激光清洗技术在某些核心光源与装备应用领域已处于领跑阶段。中国科学院半导体研究所在国内率先实现了平均功率为 1000 W 的大能量高重复频率纳秒激光 300 μm 光纤耦合输出^[19]。南京集萃激光智能制造有限公司、武汉华工激光工程有限责任公司研发的智能轮胎模具激光清洗工作站, 开创了国产化产品替代并超越进口设备的新纪元^[20]。哈尔滨工业大学牵头承担

了包含国家首个激光清洗重点研发计划的多个激光清洗重大专项, 在大型复杂构件清洗装备研究方向形成了引领态势, 其研制的超长线状光斑激光高效清洗头与高效龙门式数控激光清洗装备, 清洗效率可达 51.2 m²/h。伴随着国家“碳达峰、碳中和”战略目标实施计划的推进, 激光清洗装备对数字化和信息化水平有了更高的需求, 激光智慧清洗体系最终将融入“工业 4.0”智能化相应模块。

本文针对我国航天、高铁、海洋等领域对激光清洗的重大需求, 选取了航天新一代固液冲压发动机的 TA15 钛合金进气道、高铁车体特征件和转向架零部件、海洋船舶制造中的舱口盖等大型复杂构件作为研究对象, 介绍了近年来哈尔滨工业大学在激光清洗机制和工艺、清洗过程中多元参数的在线监测、智能装备技术等方面的研究进展, 以期为我国未来智能激光制造的可持续性发展提供一定的参考。

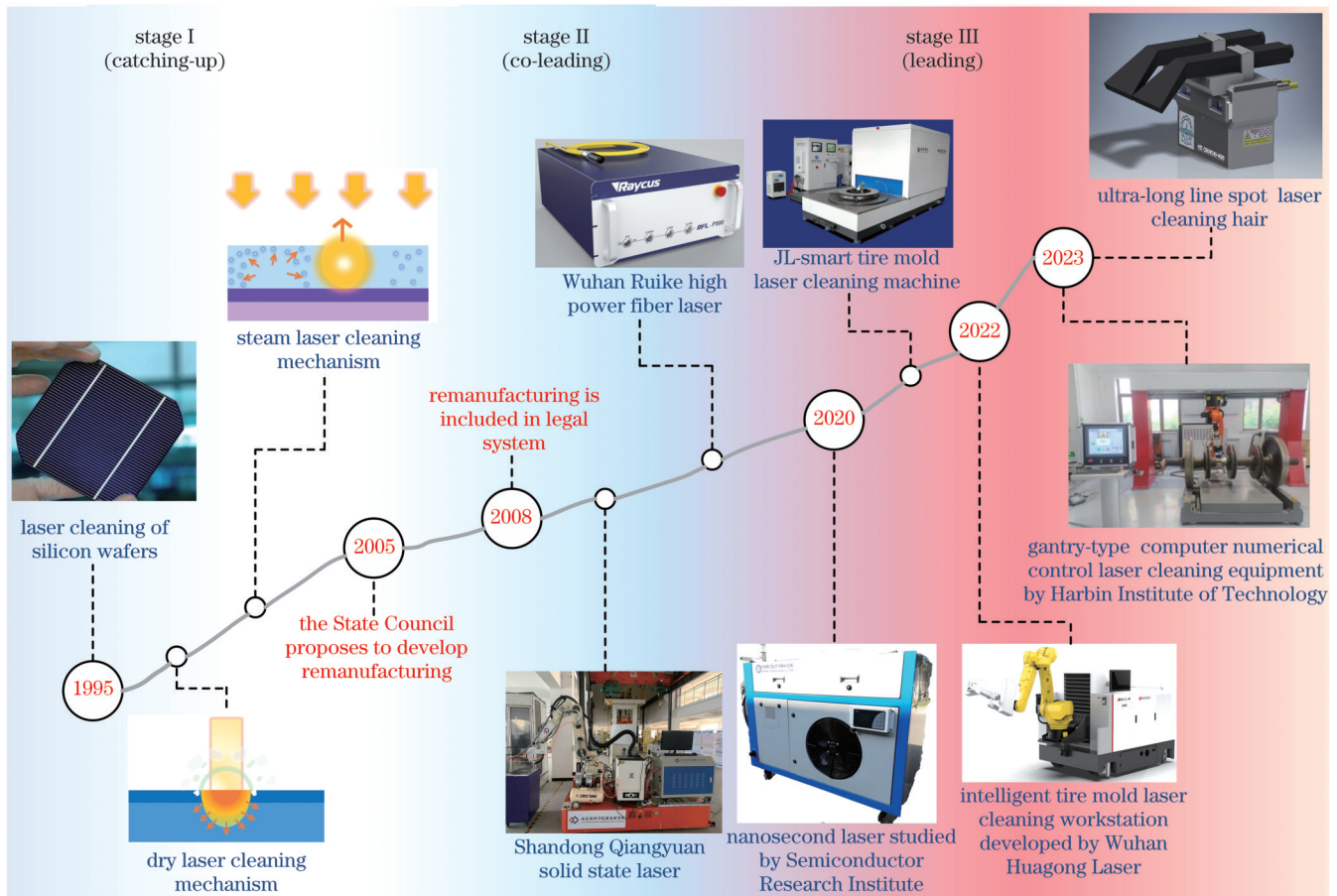


图 1 我国激光清洗技术及装备的发展历程^[7-20]

Fig. 1 Development history of laser cleaning technology and equipment in China^[7-20]

2 构件表面典型污物的激光清洗机制及建模方法的研究进展

涂层、污物、海洋微生物及微小颗粒等不同对象与基材具有不同的结合方式, 须根据不同对象的物理

特性进行区分并开展去除物理机制研究。面对不同的清洗对象或污物, 选择合适的激光清洗方法至关重要。激光清洗由多种机制组成, 主要包括热烧蚀、应力振动、热膨胀、蒸发、相爆炸、蒸发压力和等离子体冲击等^[21-23]。根据清洗介质的不同, 激光清洗又分为

激光干式清洗、蒸气(液体辅助)激光清洗、激光冲击波清洗^[24]。每种机制发生的强度取决于光学穿透深度和热扩散长度,而每种机制的相对重要性取决于激光清洗的媒介以及基体和污物的物性参数。在激光清洗过程中,激光的脉冲宽度、波长、脉冲频率、单脉冲能量、入射角度及其能量分布的变化都会引起清洗力大小、清洗对象运移转化过程及清洗效果的变化。因此需要选择合适的激光源和关键的工艺参数以实现最佳清洗。已有研究表明,激光与清洗对象相

互作用产生的清洗力是促使清洗对象与基材分离的决定性因素,但目前关于激光作用于不同对象后产生的清洗力及清洗对象的运移转化过程仍然没有直接的试验数据支撑。图 2 汇总了典型构件表面污物的清洗方法和去除机制。开展针对重大需求的典型构件激光清洗方法与质量评价体系的探索,有利于对激光清洗力产生机制、清洗对象去除机理产生全新的认识,为激光清洗方法和清洗工艺研究奠定理论基础。

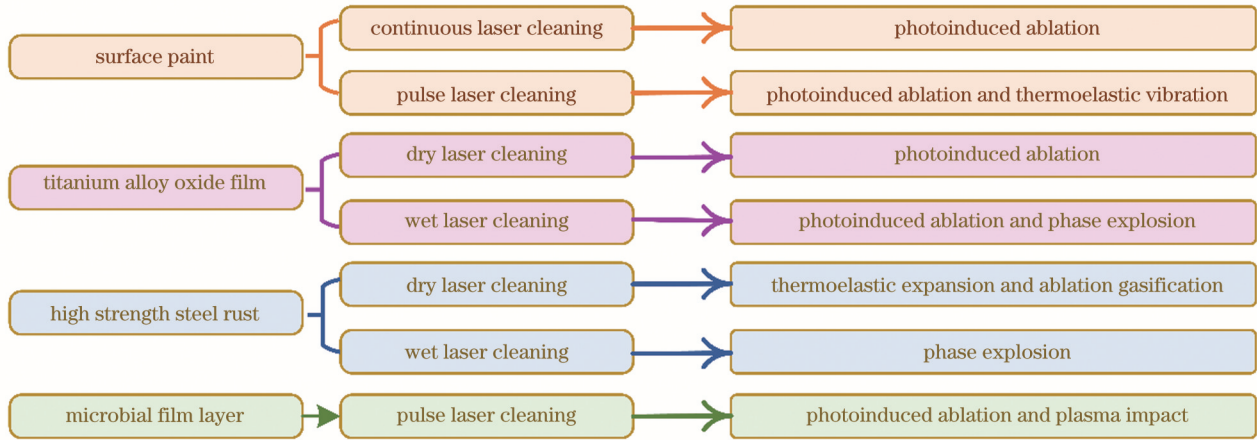


图 2 典型构件表面污物的清洗方法和去除机制^[25-35]

Fig. 2 Cleaning methods and removal mechanisms for surface contaminants on typical components^[25-35]

图 3 展示了航空钛合金进气道表面氧化膜的激光清洗效果与机制。对于钛合金进气道表面氧化膜的清洗,采用纳秒脉冲激光清洗能够完全清洗掉钛合金表面的氧化膜,同时纳秒激光的低热效应特性会防止基材的二次氧化,是较优的激光清洗方法^[25]。激光干式清洗钛合金氧化膜的主要机理是激光烧蚀[图 3(b)]^[26],其表面吸收了大量的激光能量。根据激光能量的不同,激光烧蚀机制也会发生一定改变,钛合金表面将会形成多种不同的形貌结构[图 3(a)]。当钛合金表面温度达到熔点或沸点时,氧化膜通过蒸发和飞溅被去除,同时材料表面的其他污染物被去除。在高温下钛合金表面和清洗掉的污染物发生电离,在表面产生的等离子体云吸收了部分能量。当激光能量密度较低时,表面氧化膜被部分去除,仍然存在少量的重熔区域;当能量适中时,表面氧化膜将会被去除,略有烧蚀现象,损伤可忽略;而当激光能量密度较高时,表面氧化膜被去除,且会造成极大的材料损伤,此时由于激光冲击能量和表面张力的共同作用,钛合金表面迅速凝固,最终形成了脊状结构。在较低的激光能量密度下,激光湿式清洗钛合金氧化膜的机理是激光诱导的冲击波;而在较高的激光能量密度下,清洗机理主要是激光烧蚀和相位爆破[图 3(c)]^[27]。清洗过程中钛合金的快速冷却和加热会形成马氏体钛合金,厚度约为 2.33 μm 。当激光能量密度增加到 6.37 J/cm^2 时,钛合金表面会从光滑表面变为纳米结构的突起表

面,此纳米结构对钛合金材料的后续应用具有重要意义。

图 4 展示了高铁铝合金车体表面蓝色、红色油漆的激光清洗效果与机制。对于高铁铝合金车体油漆的清洗,不同颜色、不同厚度的油漆,合适的激光清洗方法也各不相同。当油漆较薄(厚度 $\leq 40 \mu\text{m}$)时,选择油漆吸收率较低的波长的激光光源,通过热振动的方式将油漆去除,效果较好。而当油漆厚度较厚时,选择油漆吸收率较高的波长的激光光源,通过烧蚀机制将油漆去除,则是一种不错的选择。红色漆的剥离机制与蓝色漆完全不同,铝合金表面残留油漆呈现疏松的网状形貌。红色油漆的主要剥离机制为振动机制^[28],在清洁过程中激光能量渗透到基底,基板温升产生的热应力使油漆脱落,整个油漆层可以去除。在相同激光能量输入下,蓝色油漆的温度远高于红色油漆,而蓝色油漆的基体热应力远低于红色油漆的基体热应力^[29]。当油漆温度达到沸点时,油漆被蒸发并去除。此外,还有其他耦合机制,如层裂、燃烧、等离子体冲击等。

图 5 展示了高强钢船体表面铁锈的激光清洗效果与机制。对于高强钢船体铁锈的激光清洗,干式清洗过程中的主要去除机制为氧化膜吸收能量发生气化合^[30]。当表面的氧化物发生气化蒸发时,会对试样表面产生一个向下的反作用力,因此更容易去除较厚的氧化膜。液膜辅助式激光除锈的主要机制为液滴吸收

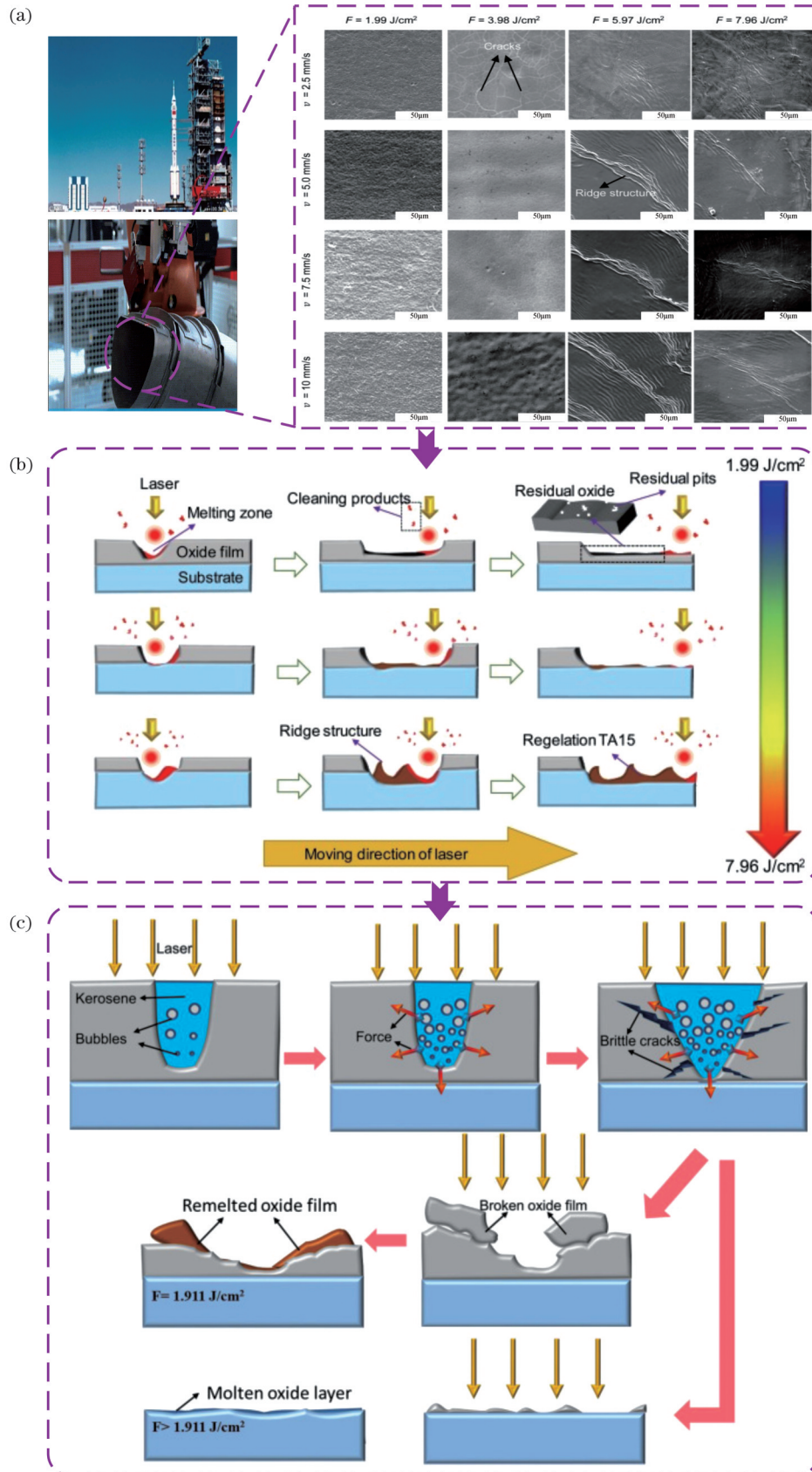


图3 航空钛合金进气道表面氧化膜的激光清洗效果与机制^[25-27]。(a)钛合金清洗后的表面形貌；(b)激光干式清洗钛合金氧化膜的主要机理；(c)激光湿式清洗钛合金氧化膜的主要机理

Fig. 3 Laser cleaning effect and mechanisms of oxide film on surface of aviation titanium alloy inlet^[25-27]. (a) Surface morphologies of titanium alloy after cleaning; (b) main mechanism of laser dry cleaning of titanium alloy oxide film; (c) main mechanism of laser wet cleaning of titanium alloy oxide film

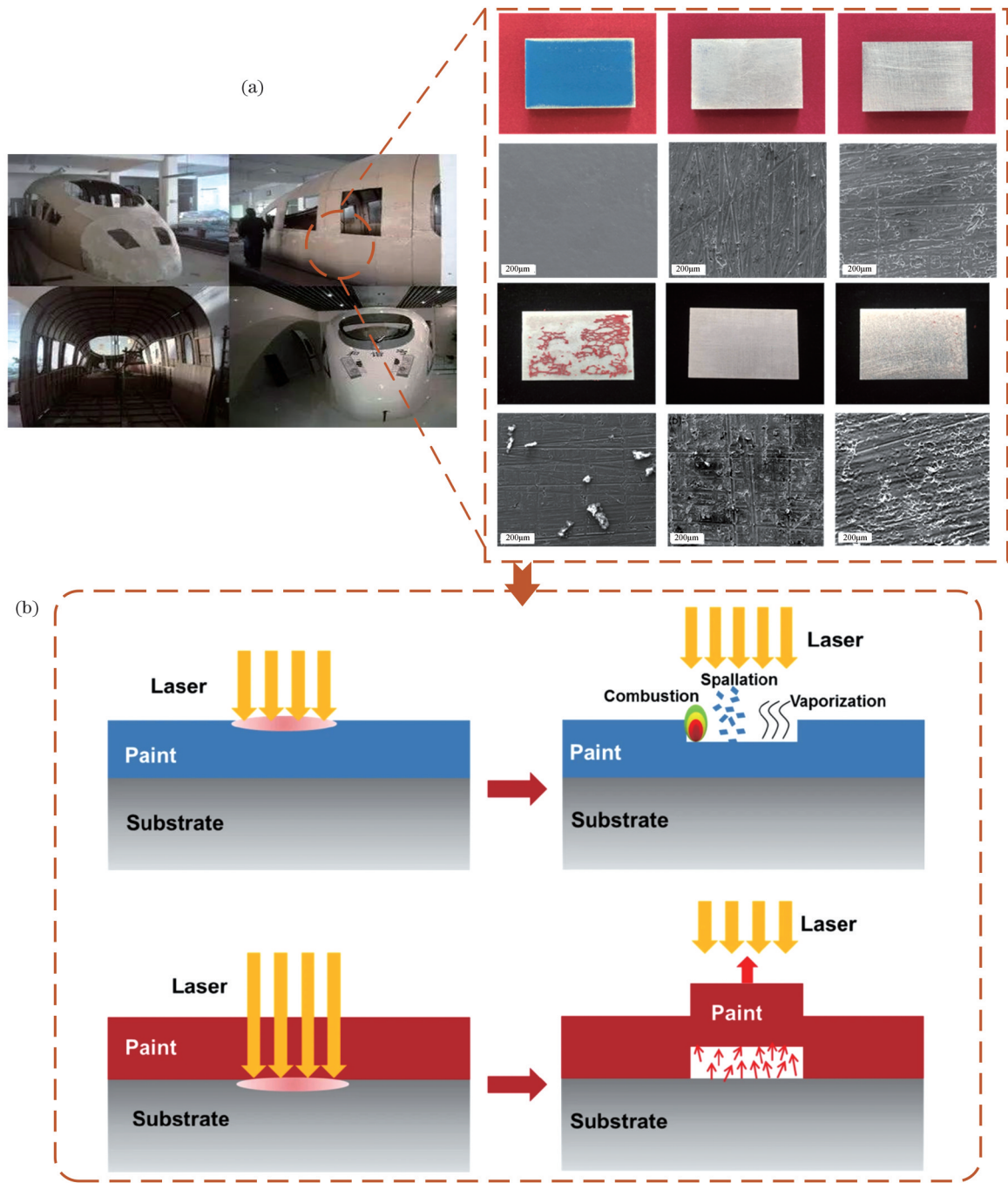


图 4 高铁铝合金车体表面油漆的激光清洗效果与机制^[28-29]。(a) 铝合金清洗后的表面形貌；(b) 激光干式清洗铝合金表面蓝色/红色油漆的主要机理

Fig. 4 Laser cleaning effect and mechanisms of paint on high-speed aluminum alloy car body surface^[28-29]. (a) Surface morphologies after aluminum alloy cleaning; (b) main mechanism of laser dry cleaning of blue/red paint on aluminum alloy surface

能量发生相爆炸,通过产生的冲击力去除锈层。由于液膜的爆发性沸腾作用,相爆炸机制对除锈的影响会明显增强,故表面的氧化膜去除效果更好,但不容易去除埋藏较深的氧化物。不同的锈层去除机制对表面熔融金属的流动也会产生一定的影响^[31-32]。主要去除机制为相爆炸时,液滴爆炸产生的侧向推力可以促进熔融层的流动,使表面更加平坦,而气化机制中产生的氧化物蒸气在向上逸出的过程中会排开凹坑周围的熔融金属,使液态金属不易填充凹坑。

图 6 展示了铝合金表面海洋微生物的激光清洗效果与机制。对于海洋微生物的清洗,窄脉宽、高峰值功率激光的清洗效果较好,胞外多聚物(EPS)层和藤壶基片的激光去除机制分别为烧蚀气化和冲击波剥离^[33-35]。微生物大分子单链在多光子吸收的过程中会发生断裂,磷酸甘油酯、葡萄糖、氨基乙酸和尿嘧啶等分解产生大量 C、O、N 和 H 原子,随后原子在光子的电离下产生离子,在等离子体冲击与烧蚀机制的共同作用下,海洋微生物可以更好地被去除。实际上,对于油

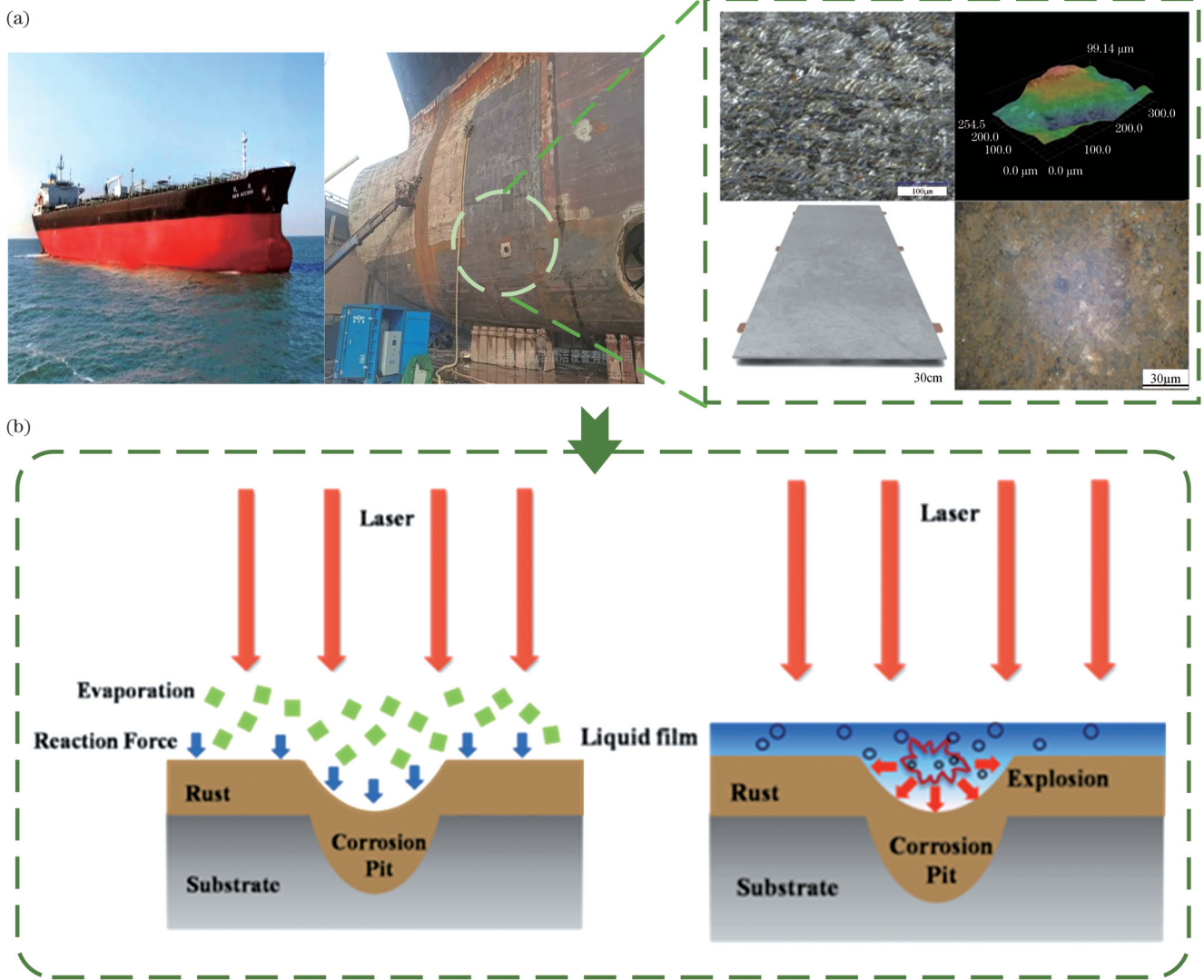


图 5 高强钢船体表面铁锈的激光清洗效果与机制^[30-32]。(a)高强钢清洗后表面形态;(b)激光干式/湿式清洗高强钢船体表面铁锈的主要机理

Fig. 5 Effect and mechanisms of laser cleaning of rust on high strength steel hull surface^[30-32]. (a) Surface morphologies of high strength steel after cleaning; (b) main mechanisms of laser dry/wet cleaning of surface rust on high strength steel hull

漆、海洋微生物等有机物,在低激光能量密度的条件下光化学作用对其产生一定作用,从而导致有机物的化学键断裂,主要表现为有机物变质、变色、失去活性等。对于氧化膜、铁锈等无机物,在低激光能量密度下材料往往无任何变化。随着激光能量密度的升高,污物出现烧蚀、气化等现象,在此参数范围内,有机物会产生燃烧火焰的现象;随着激光能量密度的继续升高,等离子体产生,形成等离子体冲击波、光剥离等机制。

激光清洗后的板件表面硬度高于机械打磨和化学清理处理过的板件。激光清洗不仅不会损伤母材,还会对母材表面产生一定的强化作用,提高母材表面的硬度,这对于合金板件是非常有好处的。作为非接触式的激光清理方式,所获得的板件表面的粗糙度远小于化学清理和机械打磨。化学清理之后仍要进行擦拭和打磨处理,使得粗糙度增大,这也是机械打磨

和化学清理两种接触式清理方式很大的问题。机械打磨后的表面,摩擦造成的刮痕非常明显,严重影响了合金材料的美观;化学清理后的表面,油污和氧化膜基本除去,然而去除效果并不一致,呈现出高低不平的分层现象,且后续还要进行接触式处理以去除油污和氧化膜;激光清理后的表面平整且均匀,还原了铝合金基底的完整形貌,很好地满足了需要。从这一点来看,激光清理、化学清理和机械打磨的清理效果依次由好到差,激光清理的效果最为优秀。此外,激光清理后的钛合金、铝合金、高温合金、不锈钢,经激光焊接后无任何气孔缺陷,均可满足 II 级焊缝标准。

目前,有各种激光器、工件材料和影响清洗质量的相关参数,例如激光功率、激光波长、材料类型和厚度、能量、脉冲持续时间等,因此了解激光清洗现象对于实现精确和高质量的加工至关重要。建立清洗热

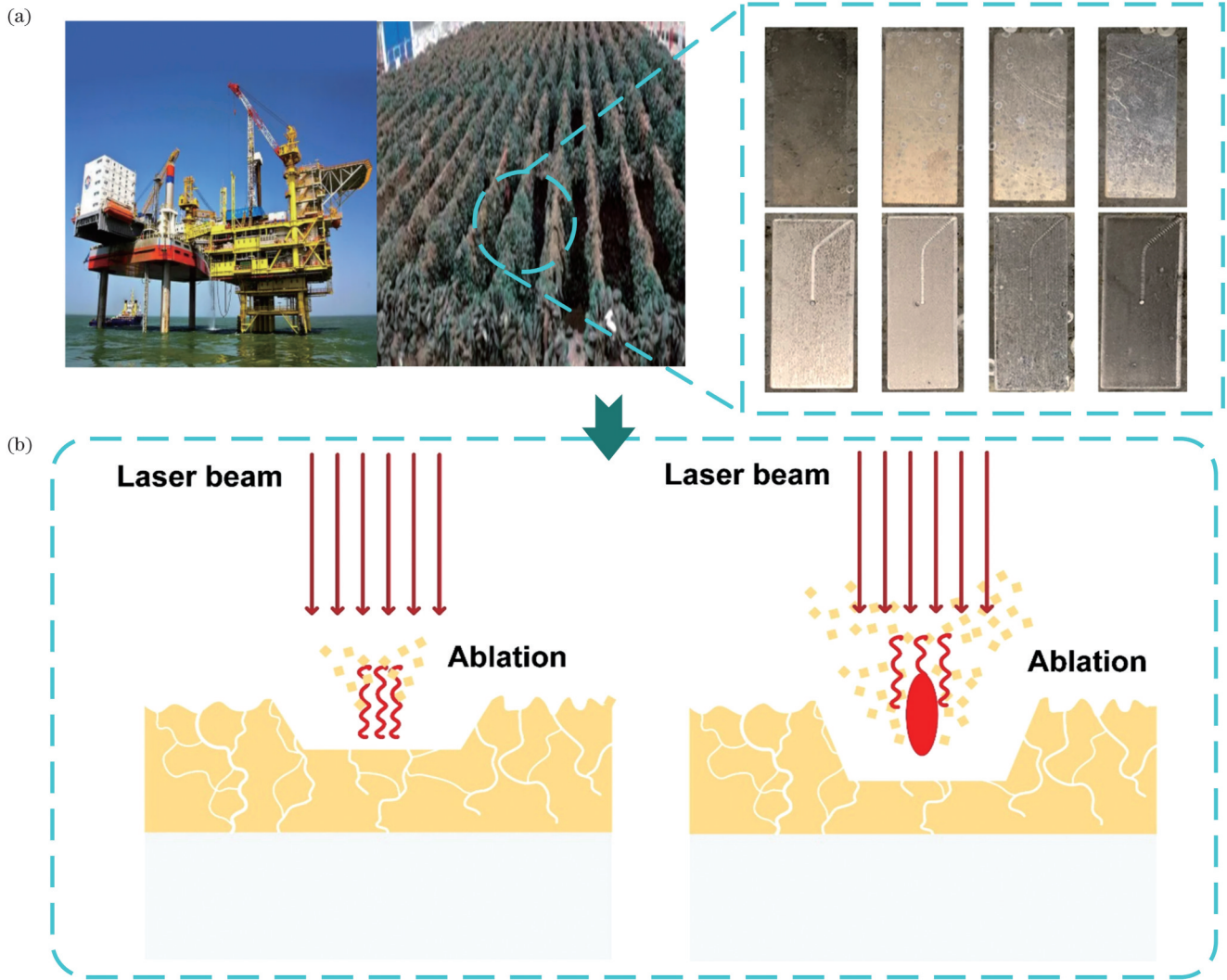


图 6 铝合金表面海洋微生物的激光清洗效果与机制^[33-35]。(a) 铝合金清洗后表面形貌；(b) 激光干式清洗铝合金表面海洋微生物的主要机理

Fig. 6 Effect and mechanisms of laser cleaning of marine microorganisms on aluminum alloy surface^[33-35]. (a) Surface morphologies after aluminum alloy cleaning; (b) main mechanisms of laser dry cleaning of marine microorganisms on aluminum alloy surface

振动模型将有助于更好地阐明激光清洗行为、温度场、应力场随激光时空-能量特性等参数的变化规律,预测激光清洗过程中不同清洗参数与清洗质量之间的关系。Zhou 等^[36]通过计算机模拟和实验研究了短脉冲激光烧蚀速率与激光注量的关系,确定了最佳工艺条件。Yue 等^[37]利用有限元模型成功地模拟了锥形微槽结构的矩形脉冲和高斯脉冲激光清洗,并在此基础上预测了清洗阈值。Marimuthu 等^[38]利用有限元模型预测了去除各种污染物所需的最佳脉冲数量和激光功率,并基于仿真结果提出了准分子激光清洗的机理。Oh 等^[39]通过数值模拟分析了表面清洗效率和压力/温度/速度场的空间变化,研究了激光脉冲能量和光斑尺寸等工艺参数对清洗过程的影响,并讨论了最佳清洗条件。目前现有的清洗模型还不能完整准确地模拟激光清洗行为,温度场/应力场理论模型仍有待完善。哈尔滨工业大学郭斌、徐杰团队利用有限元方法建立了热振动模型,模

拟了激光清洗中的温度以及应力场,并与实验结果进行了对比,最终温度场与热应力场的计算精度均超过了 85%^[40-43]。

在激光清洗过程中,脉冲激光提供的高能量密度引起突然的加热-冷却循环。材料对激光能量的吸收和表面相应的加热可以用热传导微分方程的解析解或数值解进行表示。激光脉冲的时间形状对材料的热传递有重要的影响,基于解析解的建模通常以一些假设为中心,在实际情况下并不总是能够解决整个系统的问题^[44]。与解析法相比,有限元(数值)法适用于复杂几何结构^[45]。其理论计算采用积分方程和适当边界条件下的偏微分方程(PDE)。如图 7 所示,激光清洗过程中的能量转换模型^[40]为

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_{ext}, \quad (1)$$

式中: Q_1 是基材表面的热积累能量,即温升所需的能量; Q_2 是基材内部热传导的能量; Q_3 是基材表面的热

对流能量; Q_4 是基材表面的热辐射能量; Q_{ext} 是激光作用于基材表面所产生的能量总和。

换热传导方程常常表示为

$$\rho c_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; c_1 为比热容; λ 为材料的导热系数; T 为表面温度; t 为时间; x, y, z 为位置坐标。后续着重强调了指定网格法向速度, 用以表征基材在烧蚀气化后的轮廓边界。激光烧蚀基材表面污染物层时, 污物层气化消失, 固体层边界会下降。

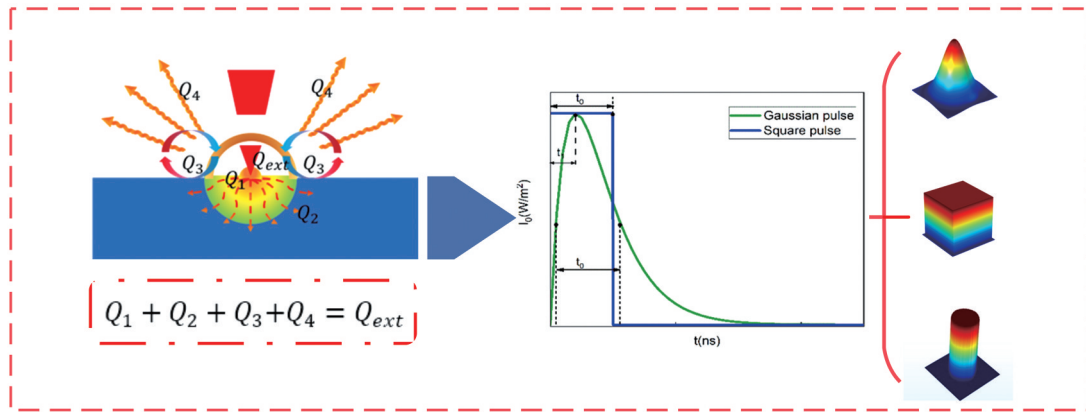


图 7 激光清洗过程中能量转换模型^[40]

Fig. 7 Energy conversion model in laser cleaning process^[40]

如图 8 所示, 针对钛合金进气道表面氧化膜的清洗, 建立了 TA15 钛合金在纳秒脉冲激光作用下的实验模型^[41]。高斯脉冲激光清洗表面氧化膜的温度随时间发生变化, 表面能够达到的最高温度均随着峰值功率的增大而增大[图 8(a)]。当峰值功率密度为 19.11 MW/cm^2 时, 表面温度才能超过表面氧化膜的沸

点, 即氧化膜才能被较好地去除, 从而实现激光清洗。对于平顶光斑, 激光加载的强度在任何地方都是相同的[图 8(b)], 因此烧蚀区的烧蚀深度是相同的。随着表面激光能量的加载, 激光能量也会沿光斑的径向传导, 烧蚀面积随深度的增加而减小。因此, 通过控制纳秒脉冲激光单脉冲去除氧化膜的深度, 在适当的激光

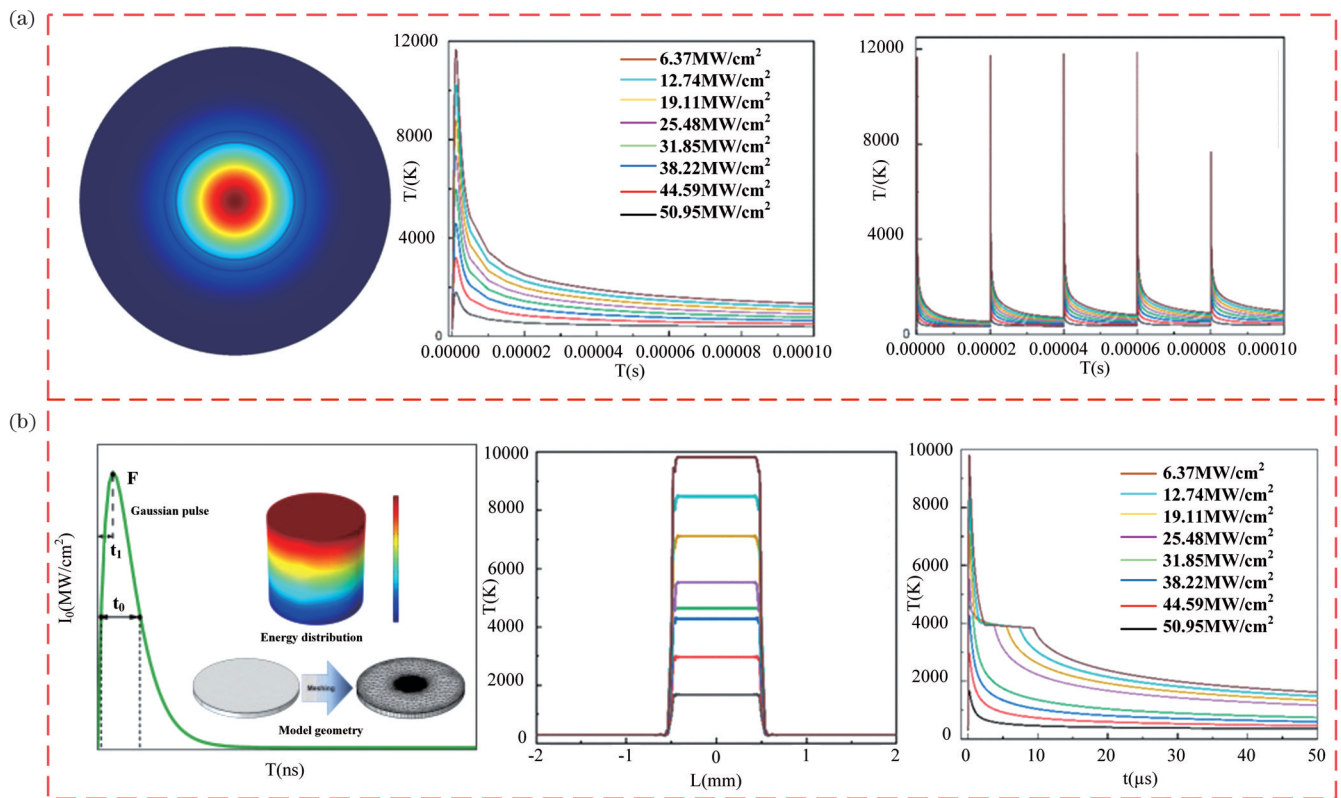


图 8 纳秒脉冲激光清洗 TA15 钛合金氧化膜有限元模型^[40-41]。(a) 高斯光斑加载; (b) 平顶光斑加载

Fig. 8 Finite element model of nanosecond pulse laser cleaning of TA15 titanium alloy oxide films^[40-41]. (a) Gaussian spot loading; (b) flat top spot loading

最大功率密度和光斑重叠率下,可完全去除氧化膜。

针对海洋 EPS 膜层的清洗,如图 9 所示,将几何模型中的海洋微生物膜层通过自由四边形方式划分成 7709 个域单元,并给出了在 30 ns 脉宽下功率为 300 W 和 800 W 时不同纳秒脉冲数量作用后的三维表面形貌轮廓^[42-43]。从图 9(a)可知,高功率条件下激光光斑烧蚀后的轮廓痕迹更大。为了分析烧蚀深度、

定量对比计算结果和测量结果,提取了数值计算后纵截面上 10 个激光脉冲作用后的边缘轮廓。随后通过实验对边缘特征和轮廓深度进行分析[图 9(b)],证明本模型预测清洗边缘轮廓和清洗深度的有效性。此外,典型特征温度点从温度场中被取出,将其与实际红外监测仪的观测结果进行对比,进一步证实了模型的可靠性。

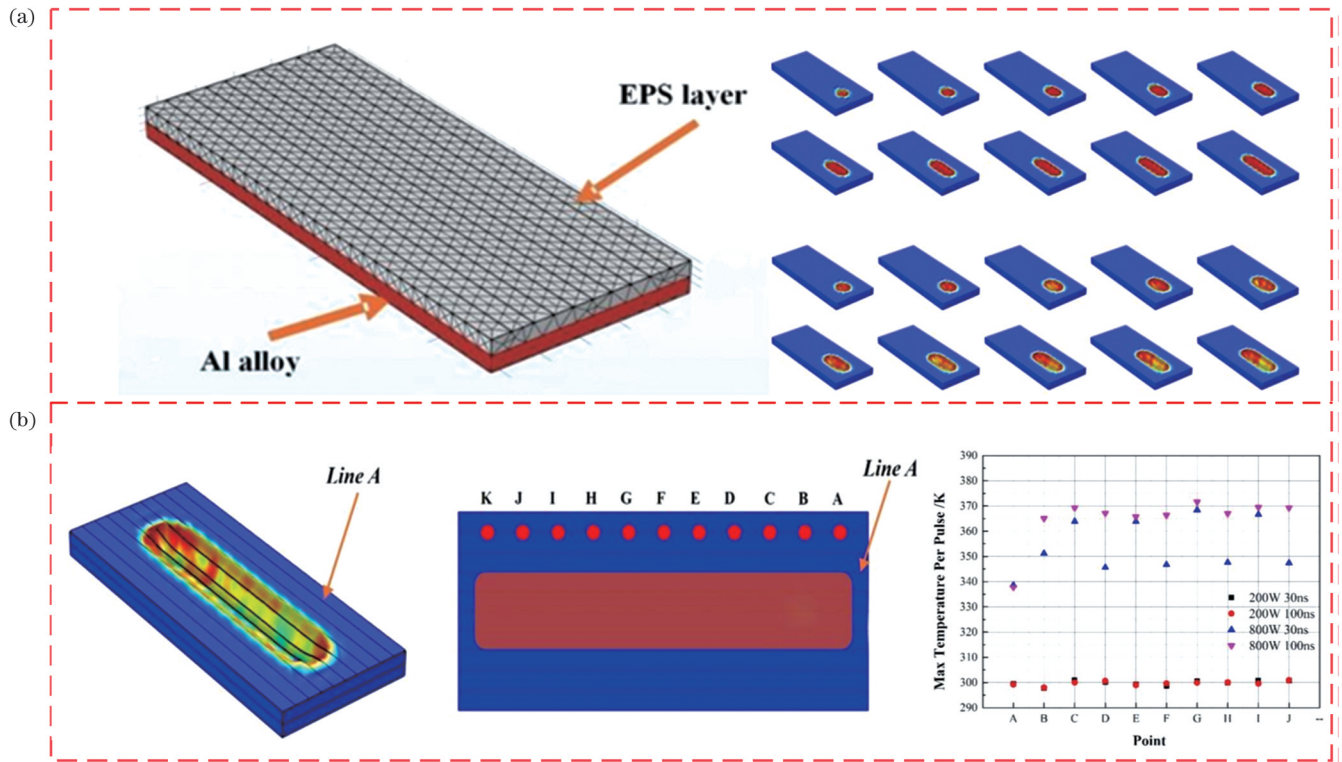


图 9 纳秒脉冲激光清洗铝合金海洋膜层有限元模型^[42-43]。(a)激光光斑烧蚀后的轮廓痕迹;(b)边缘特征和轮廓深度分析

Fig. 9 Finite element model of nanosecond pulse laser cleaning of aluminum alloy marine film layer^[42-43]. (a) Contour traces after laser spot ablation; (b) analysis of edge features and contour depth

如图 10(a)所示,激光清洗过程中表面材料的热应力随着单脉冲功率的增加而增加。材料表面的热应力随着功率波形变化,表面应力与表面温度的变化趋

势相似。而应力响应加载脉冲的速度高于温度,且相比温度在不同功率下的数值,应力在不同功率下的数值更加接近,均在 6000 MPa 左右。如图 10(b)所示,

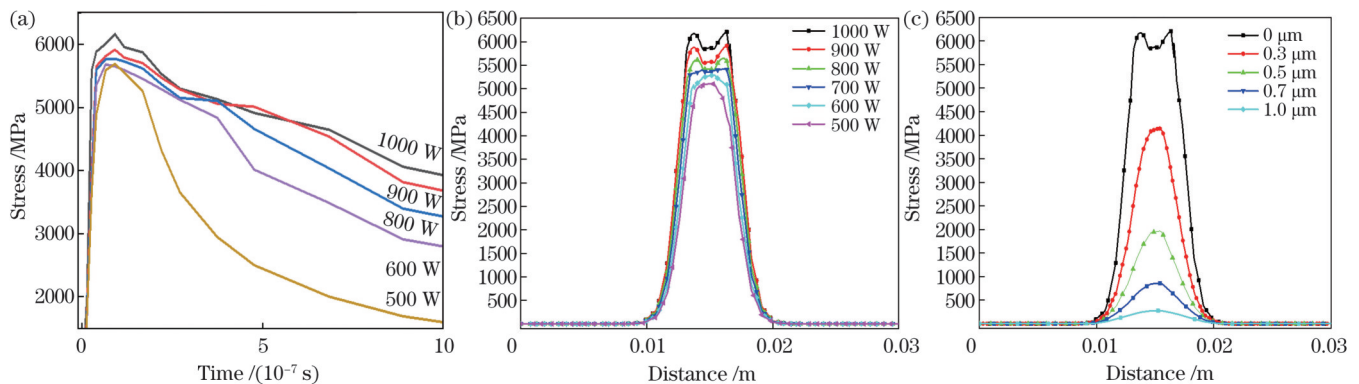


图 10 纳秒脉冲激光清洗钛合金氧化膜的热应力变化曲线。(a)不同单脉冲功率下表面应力随时间的变化;(b)不同功率下应力随距离的变化;(c)不同表面深度下应力随距离的变化

Fig. 10 Thermal stress curve of nanosecond pulse laser cleaning of titanium alloy oxide film. (a) Surface stress versus time under different single pulse powers; (b) stress versus distance under different powers; (c) stress versus distance under different surface depths

虽然表面应力分布与温度分布类似,但在 500~1000 W 时应力在不同功率下的差距较小,应力曲线随着功率的减小慢慢变得平滑,最终形成平滑突起形状。此外,材料应力也会随着表面深度的增加而迅速减小 [图 10(c)],当表面深度为 1.0 μm 时,应力很小,作用基本不明显。

3 清洗过程多元参数在线监测技术的研究进展

为了适应氧化膜、油漆、海洋微生物及微小颗粒等不同对象在基底材料表面分布的不均匀性,获得理想的激光清洗效果,需要对不同对象的清洗环境进行快速辨识并确定相应的清洗工艺参数。目前激光清洗技术已经相对成熟,未来基于在线监测的激光智能化清洗将是研究的主流方向。在环境背景和技术背景的双重要求下,为实现无损伤激光清洗,需要引进监测系统。激光束与基体表面的直接相互作用容易对精密工件表面造成严重的损伤。在激光清洗的过程中,可以选择实时监测或离线监测手段来判断清洗的效果。通

过对激光清洗过程的实时/离线监测数据进行曲线拟合,并分析激光清洗工艺参数的相关性,可指导激光清洗多元参数的调控。目前,国内外对激光清洗的在线监测研究主要集中在声发射、成像学、光谱学三个方面^[46-47]。在基于声发射的激光清洗实时监测技术中,Chen 等^[48]对激光除漆过程中各个阶段产生的声信号进行了实验研究(图 11)。结果表明,在 7~10 kHz 的频率范围内,声信号的强度和局部标准偏差(LSD)随着涂料的去除逐渐降低到一个稳定的值。这两个因素的变化比时域信号幅值更能真实地反映激光除漆状态。实验证明,该方法可用于判断激光扫描模型中的漆面是否被清洗,并且有利于激光除漆过程的实时监测和闭环控制。Tserevelakis 等^[49]介绍了一种综合的统计方法(图 12),该方法集成了 MHz 范围内的低噪声光声(PA)振幅测量,旨在建立激光清洗三个独立阶段的稳健相关性;对脉冲红外辐射的强烈吸收所产生的本征声信号与不同辐照条件下获得的清洁水平进行了比较,同时通过各种切割分析技术对处理后的大理石表面进行了评估。

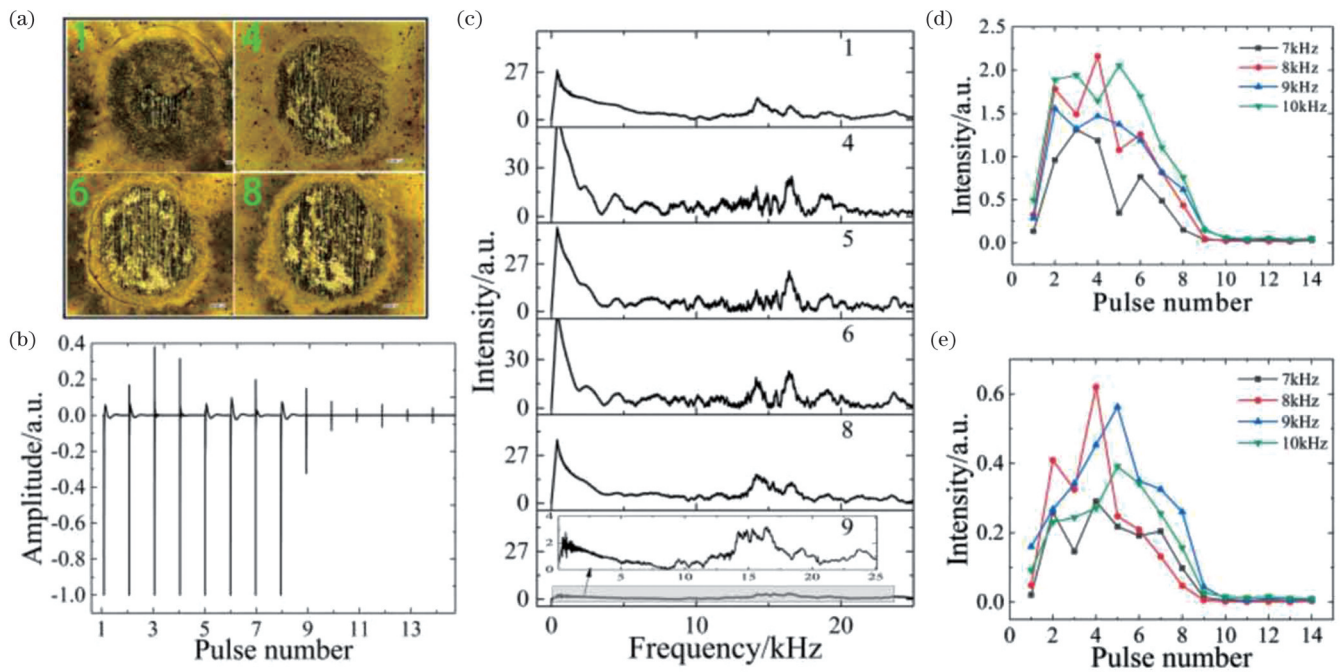


图 11 激光除漆过程中各个阶段产生的声信号强度^[48]。(a)不同脉冲照射后的涂料的表面形态;(b)1~20个脉冲的时域信号;(c)声学信号频域波形;(d)不同频率下的信号强度;(e)不同脉冲数量下的局部标准偏差
Fig. 11 Intensity of sound signals generated at each stage of laser paint removal process^[48]. (a) Surface morphologies of coatings after different pulse irradiations; (b) time-domain signals of 1-20 pulses; (c) acoustic signal frequency domain waveforms; (d) signal intensities at different frequencies; (e) local standard deviations under different numbers of pulses

在基于成像学的激光清洗实时监测技术中, Tserevelakis 等^[50]利用产生的 PA 信号并结合高分辨率光学图像,实现了准确和实时跟踪清洁过程,如图 13 所示。在自动清洗过程中,可以根据局部地壳厚度和表面形貌的不规则性,利用最大互相关幅度变化值来调节释放在样品上的激光脉冲入射数。

Kane 等^[51]量化了表面颗粒的图像分析,包括判断

图像的最佳阈值灰度级,以确定颗粒与背景基材之间的边界,如图 14 所示。

在基于光谱学的激光清洗实时监测技术中, ShangGuan 等^[52]采用激光诱导击穿光谱(LIBS)技术检测涂漆金属样品的清洁程度,并利用光纤脉冲激光将样品分为 5 种类型。使用 K 近邻分类算法对数据进行初步训练和分类,然后使用训练好的算法对测试

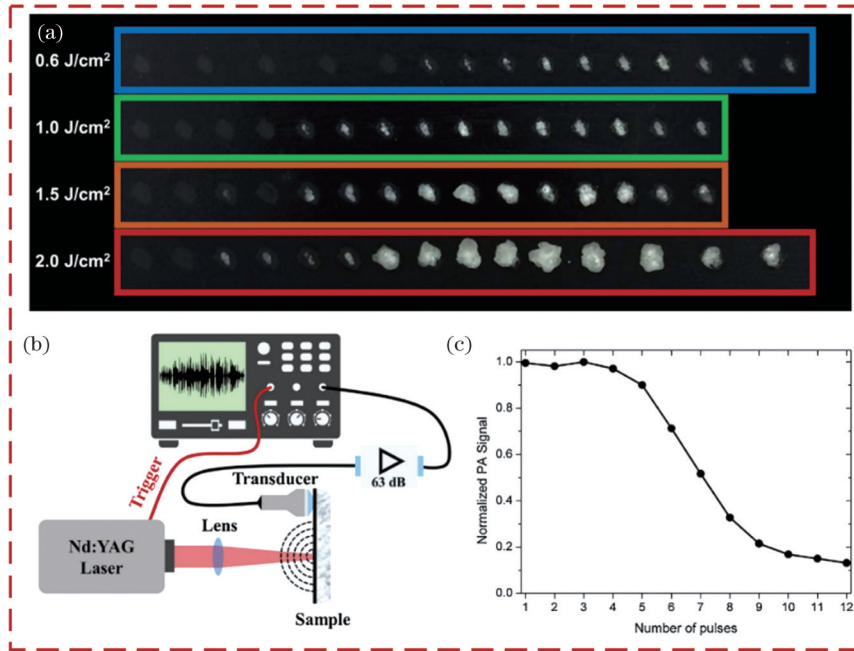


图 12 基于声信号的大理石激光清洗评估^[49]。(a)激光辅助去除不同能量通量下的黑色喷雾；(b)光声测量过程中的实验配置；(c)典型归一化光声信号演变

Fig. 12 Evaluation of laser cleaning of marble based on acoustic signals^[49]. (a) Laser assisted removal of black spray under different energy fluxes; (b) experimental configuration during photoacoustic measurement process; (c) evolution of typical normalized photoacoustic signal

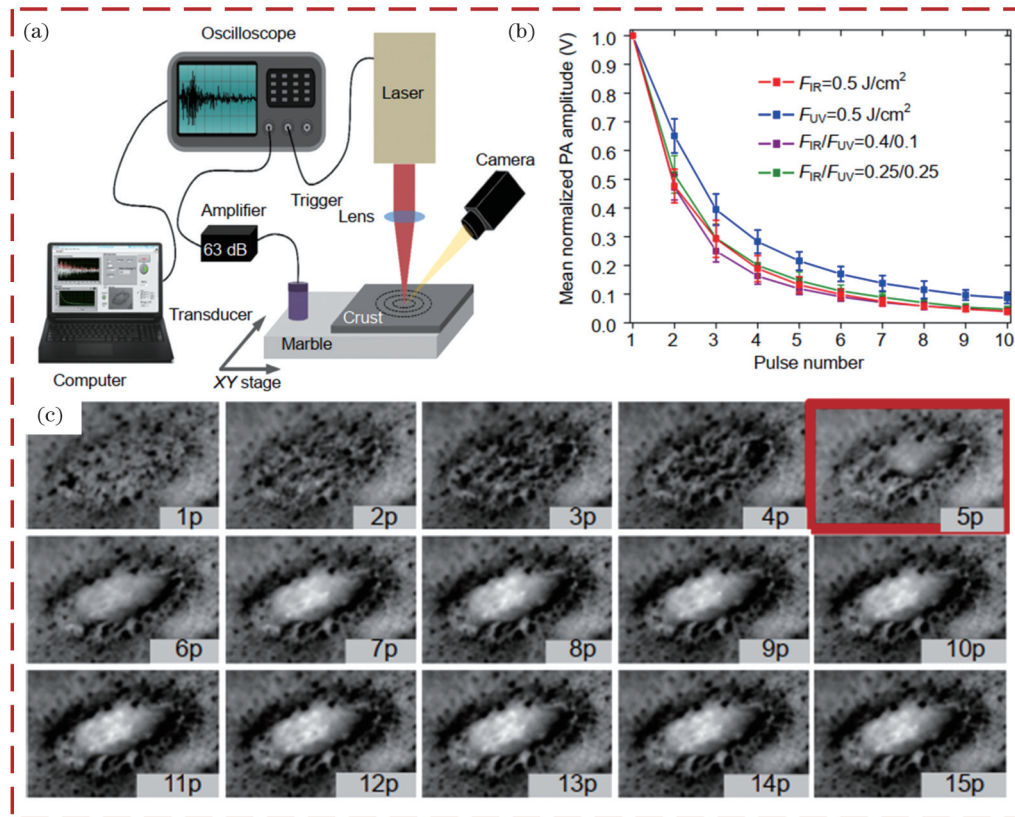


图 13 PA 信号与高分辨率光学图像相结合的实时监测系统^[50]。(a)激光清洗在线监测的实验配置；(b)不同波长记录信号的平均 PA 振幅的演变；(c)激光光斑的光学图像

Fig. 13 Real time monitoring system combining PA signal with high-resolution optical images^[50]. (a) Experimental configuration for on-line monitoring of laser cleaning; (b) evolution of mean PA amplitude of recorded signal for each wavelength; (c) optical images of laser spot

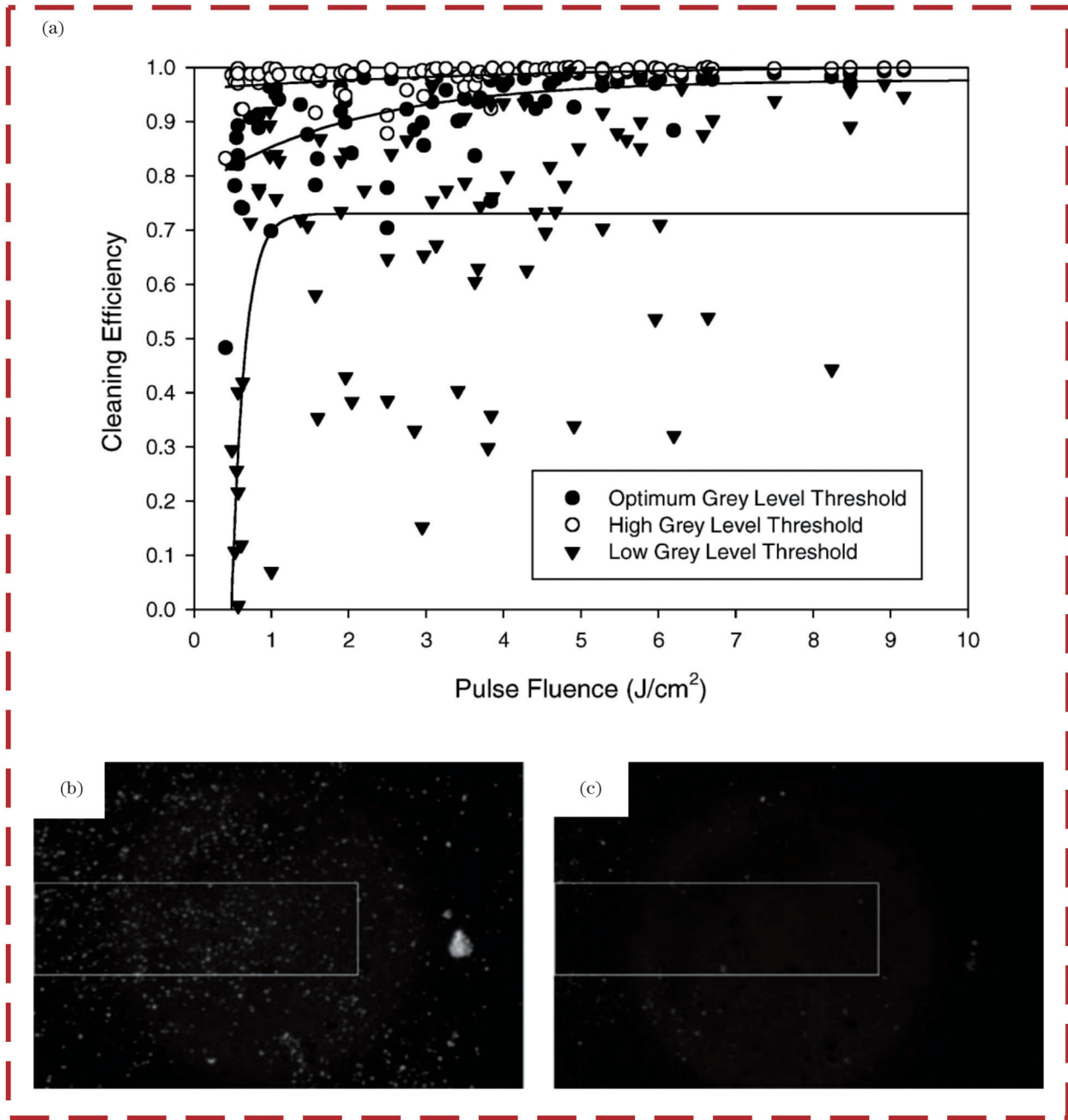


图 14 基于成像学的激光清洗实时表面颗粒鉴别方法^[51]。(a)清洁效率随激光脉冲通量的变化；(b)载波片表面颗粒清洗前的图像；(c)载波片表面颗粒清洗后的图像

Fig. 14 Real-time surface particle identification method for laser cleaning based on imaging^[51]. (a) Cleaning efficiency versus laser pulse flux; (b) image of particles on carrier surface before cleaning; (c) image of particles on carrier surface after cleaning

数据进行分类,如图 15 所示,实现了激光除漆过程中不同清洗程度的实时自动判别和分类。其所述方法为激光除漆的自动化和智能化提供了技术支持。Choi 等^[53]使用高功率激光油漆清洗工艺实现了油漆去除,通过 LIBS 监测对 304L 不锈钢表面进行检查,开发了两种不同类型的基于 LIBS 的 2D 映射的元素分布图,如图 16 所示。通过计算 Pearson's 系数得到 Fe、Cr、Na 元素含量与 LIBS 峰强度的二维相关系数分布图。

当前基于声发射、成像学、光谱学的激光清洗过程

监测技术,虽能实现一定程度的监测,但或多或少都存在一些问题。基于声发射的监测法成本低、易操作,但背景噪声会对有用信号造成较大影响。基于成像学的监测法抗干扰能力强、应用范围广,但是实时反馈性能较差。基于光谱学的监测技术具有快速、准确的特点,但当前存在成本较高的缺点^[54]。同时,激光清洗技术中激光多元参数的准确性及其调控的精确性也对激光清洗效果产生明显的影响。因此,为了保证激光清洗技术满足复杂环境的应用要求,不同环境多变量耦合快速辨识方法及激光清洗多元参数短时在线协同调控

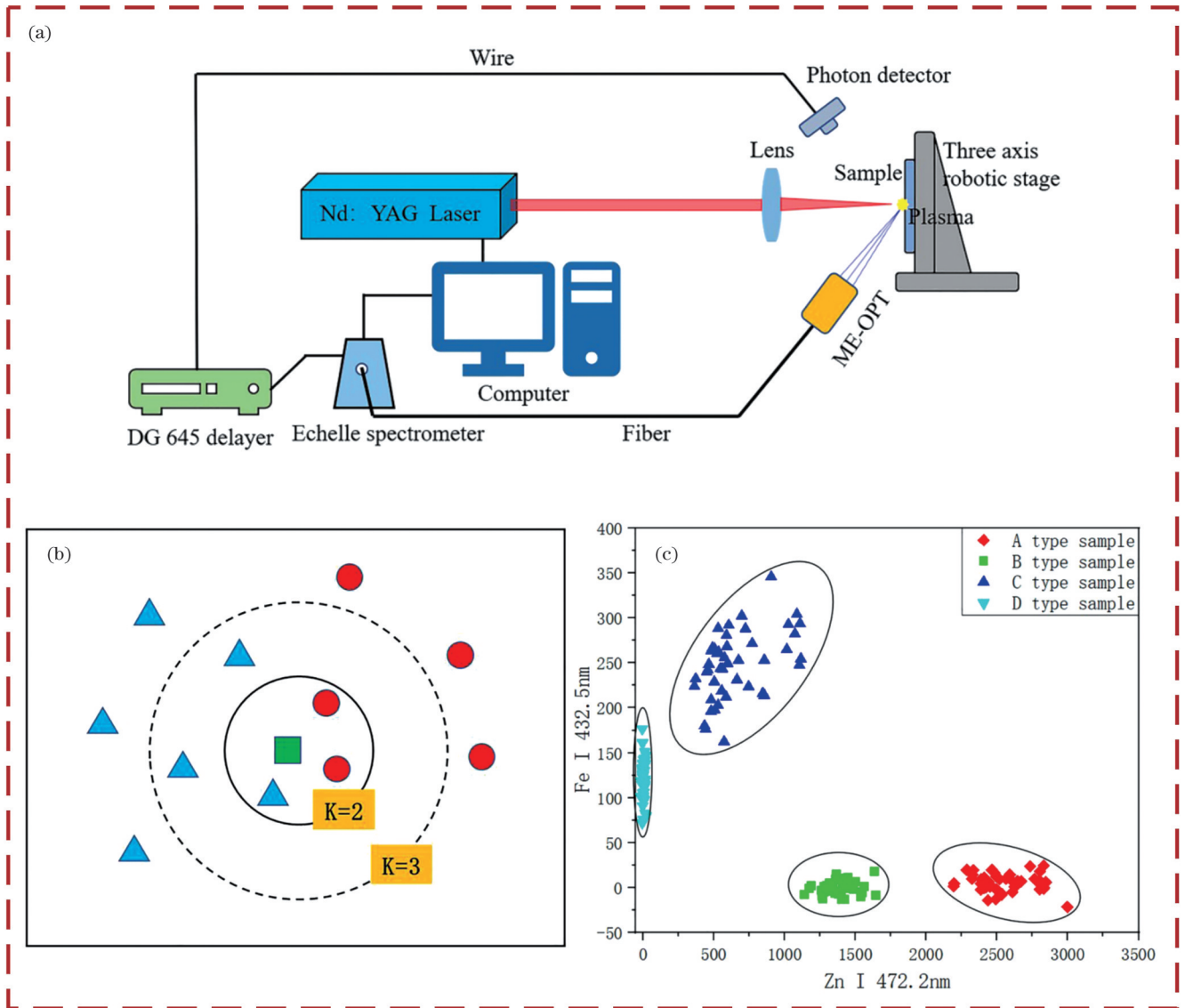


图 15 脉冲激光清洗过程中利用 LIBS 技术检测金属样品的清洁程度^[52]。(a)激光清洗实时监测系统示意图；(b)K 近邻关系示意图；(c)光谱峰值的分布

Fig. 15 Detecting cleanliness of metal samples using LIBS technology during pulse laser cleaning process^[52]. (a) Schematic of real-time monitoring system for laser cleaning; (b) schematic of K-nearest neighbor relationship; (c) distribution of spectral peak

是关键技术和重要途径。基于国内外激光清洗在线监测技术存在的缺点,哈尔滨工业大学郭斌、徐杰团队攻克了激光清洗多变量耦合快速辨识方法及其短时在线调控关键技术,建立图 17 所示的基于光谱学的多元参数在线检测与调控系统,为后续研制智能柔性选区精密激光清洗装备以及大型构件的高效激光清洗装备提供了技术支持。该系统实现了激光清洗质量的实时调控,激光光斑尺寸与平均功率输出精度的误差优于 1%。

此外,哈尔滨工业大学郭斌、徐杰团队基于表面漫散射光谱技术,开发了振镜扫描表面光散射吸收表征系统及其软件。采用与激光头相同的振镜和平面场镜聚焦系统,基于氧元素的谱峰强度比值(OC 参数)可以自动区分材料表面清洗不足区域与过清洗区域。如

图 18 所示,钛合金样品的漫散射吸收光谱出现特征信号,利用 420 nm 附近的信号和 800 nm 附近的信号的强度比值(OC 参数)作为判断过清洗的标准。同时,利用粗糙度参数和过清洗参数的反馈,可以实现清洗激光功率的准确控制。

为满足 Helmholtz-Kirchhoff 衍射积分条件,假设表面为理想反射面或是表面轮廓粗糙度的均方根误差远小于入射波长,当自相关长度远大于入射波长时,可以获得封闭形式的解。采用物体表面粗糙度的 Beckmann-Kirchhoff 散射公式的简化模型,通过测量样品表面的自相关长度和表面轮廓粗糙度的均方根误差来描述样品表面粗糙度,并使用它们的比值(σ_p)来表征表面粗糙度。在激光清洗时,样品表面的反射和散射光被光纤探测头收集,并被导入到光纤光谱仪中

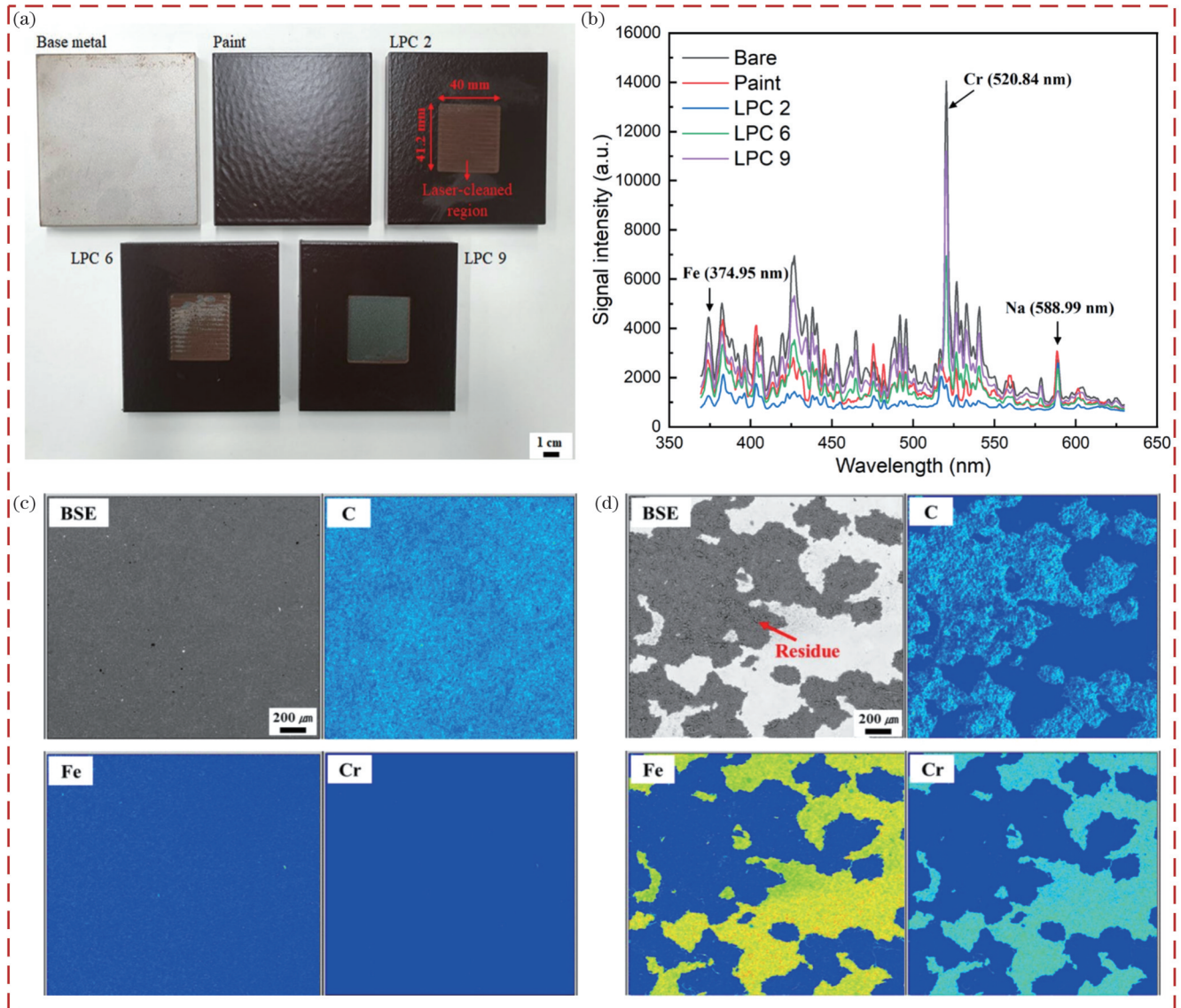


图 16 激光除漆过程中基于 LIBS 的 2D 映射的元素分布图^[53]。(a)金属、带有漆层的金属和激光清洗后试样的图像；(b)各试样的 LIBS；(c)金属背散射电子(BSE)图像和电子探针分析(EMPA)获得的相应元素分布图；(d)油漆 BSE 图像和 EMPA 获得的相应元素分布图

Fig. 16 2D mapping element distribution maps based on LIBS during laser paint removal process^[53]. (a) Images of base metal, painted metal, and samples after laser cleaning; (b) LIBS of each sample; (c) backscattered electron (BSE) image and corresponding elemental distribution maps obtained from electron microprobe analysis (EMPA) for base metal; (d) BSE image and corresponding elemental distribution maps obtained from EMPA for paint

进行光谱检测,最后由计算机进行粗糙度、颜色对比度、拟合程度等数值的计算和分析以确定激光清洗表面质量。当激光清洗高强钢时,试样上有一个激光灼伤的黑色线,如图 19(a)中 100 W 和 200 W 之间的区域所示。这条灼伤的黑色线在表面粗糙度曲线上表现为粗糙度明显增加,说明用 σ_g 值来表征高强钢的表面质量是可行的。通过具体试验测试得出,高强钢激光清洗在线检测的 σ_g 值与表面粗糙度仪检测的粗糙度(R_a)结果虽然有所差异,但具有相同的变化规律。

利用激光清洗铝合金时,如图 20 所示,激光功率加大后,熔融深度加大,过清洗会导致 σ_g 值变大,从而导致粗糙度评价降低。铝合金激光清洗在线检测的 σ_g

值与表面粗糙度仪检测的 R_a 结果虽然有所差异,但也具有相同的变化趋势,随着功率的增加先降低再升高,在 300 W 附近其值较小,表明在该功率段可获得较好的激光清洗表面质量。

本课题组搭建了基于单点式激光测振仪的变形测试平台(图 21),提出了高精度激光变形测量方法,并与点阵结构光测量系统进行了对比,验证了点阵结构光测量系统的可靠性。利用变形量检测激光清洗质量,提出了激光清洗过程的在线调控策略。采用最优工艺清洗时,激光对试样表面无明显影响,试样不发生变形。该现象也与激光干式清洗的自截止理论相吻合。

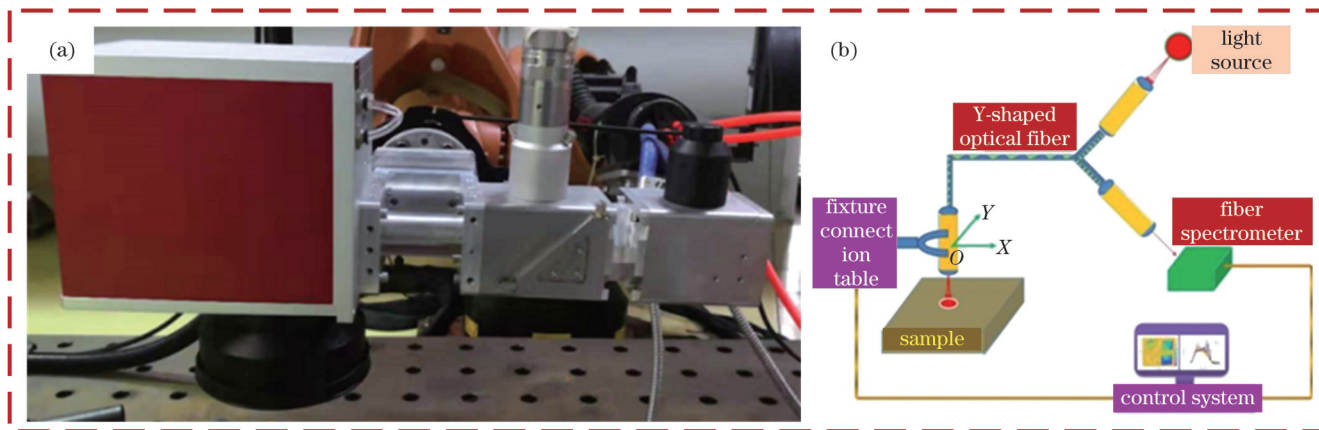


图 17 基于光谱学的多元参数在线检测与调控系统。(a)实物图;(b)示意图

Fig. 17 Multivariate parameter online detection and control system based on spectroscopy. (a) Physical image; (b) schematic

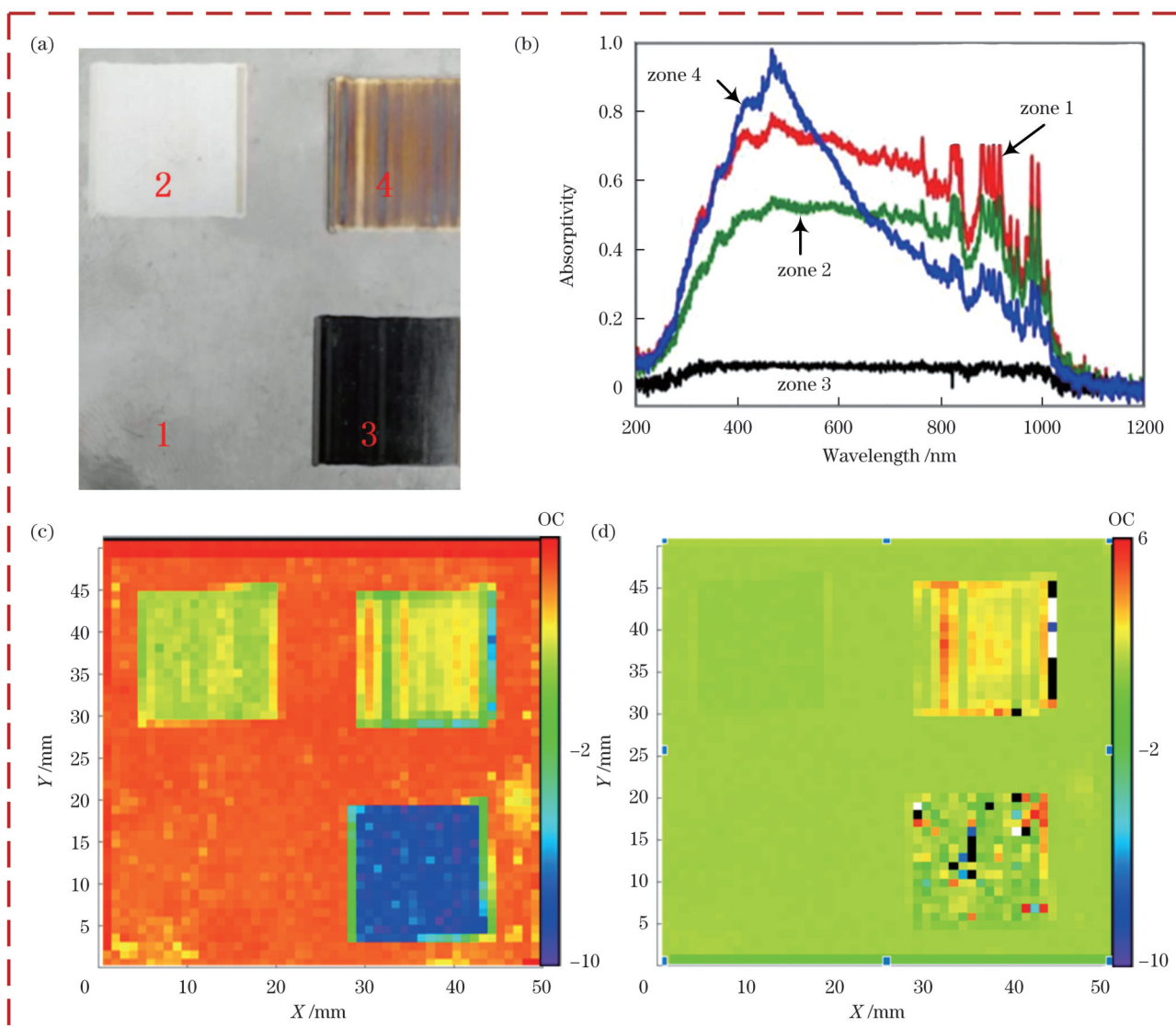


图 18 钛合金各区域激光清洗形貌和漫反射吸收谱图。(a)钛合金各区域的激光清洗形貌,其中 1 区为未清洗区,2 区为清洗不足区,3 区为清洁区,4 区为过清洗区;(b)钛合金各区域的漫反射吸收谱图;(c)钛合金清洁区表征;(d)钛合金过清洁区表征

Fig. 18 Laser cleaning morphology and diffuse reflection absorption spectrum of titanium alloy in each area. (a) Laser cleaning morphology of titanium alloy in each area, where zone 1 is uncleaned area, zone 2 is insufficient cleaning area, zone 3 is clean area, and zone 4 is over cleaned area; (b) diffuse reflection absorption spectrum of titanium alloy in each area; (c) characterization of clean area of titanium alloy; (d) characterization of over-cleaned area of titanium alloy

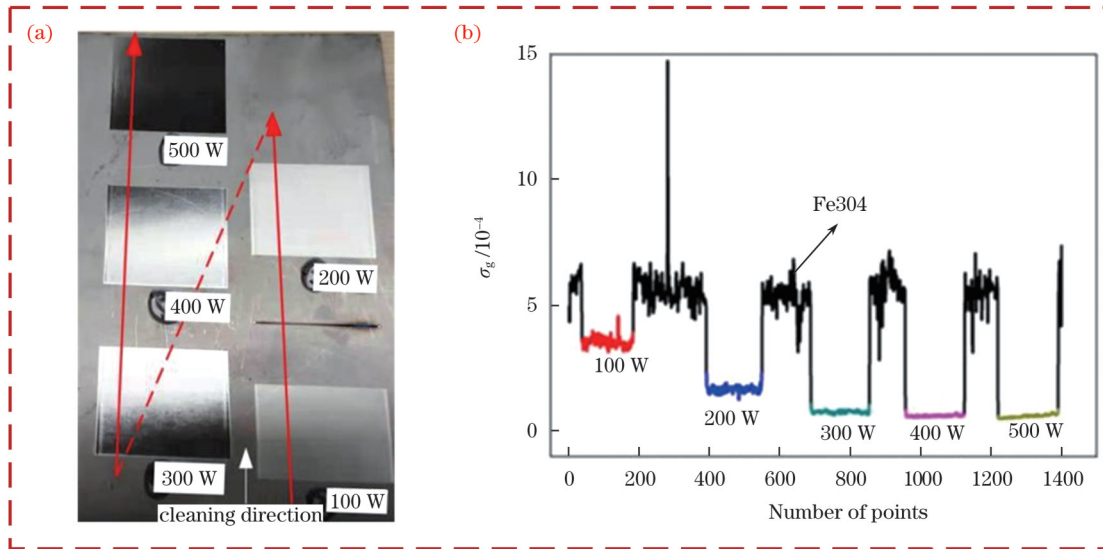


图 19 高强度钢激光清洗表面质量在线光谱检测。(a) 光谱检测路径; (b) σ_g 值

Fig. 19 Online spectral detection of surface quality of high-strength steel after laser cleaning. (a) Spectral detection path; (b) σ_g value

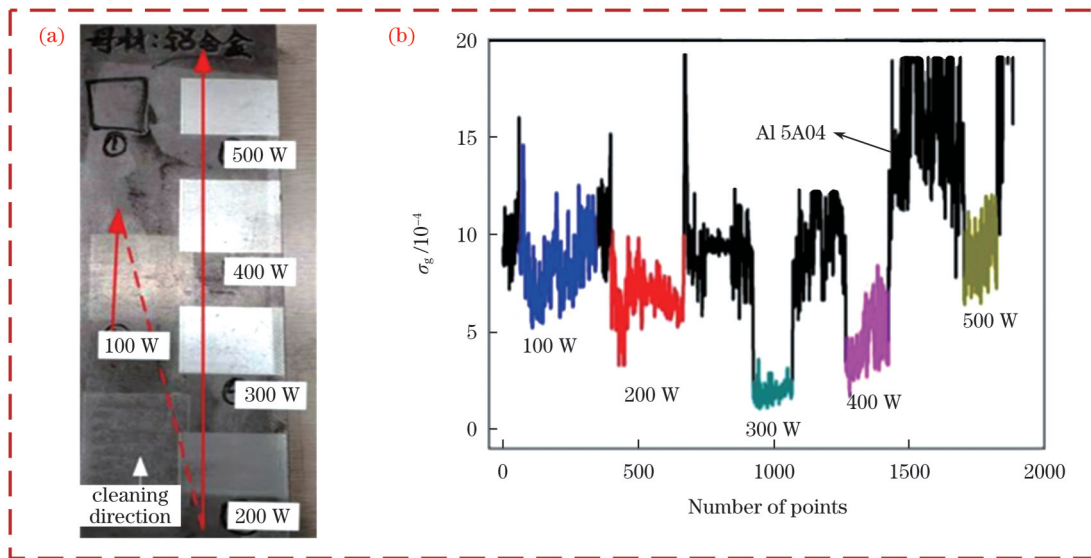


图 20 铝合金激光清洗表面质量在线光谱检测。(a) 光谱检测路径; (b) σ_g 值

Fig. 20 Online spectral detection of surface quality of aluminum alloy after laser cleaning. (a) Spectral detection path; (b) σ_g value

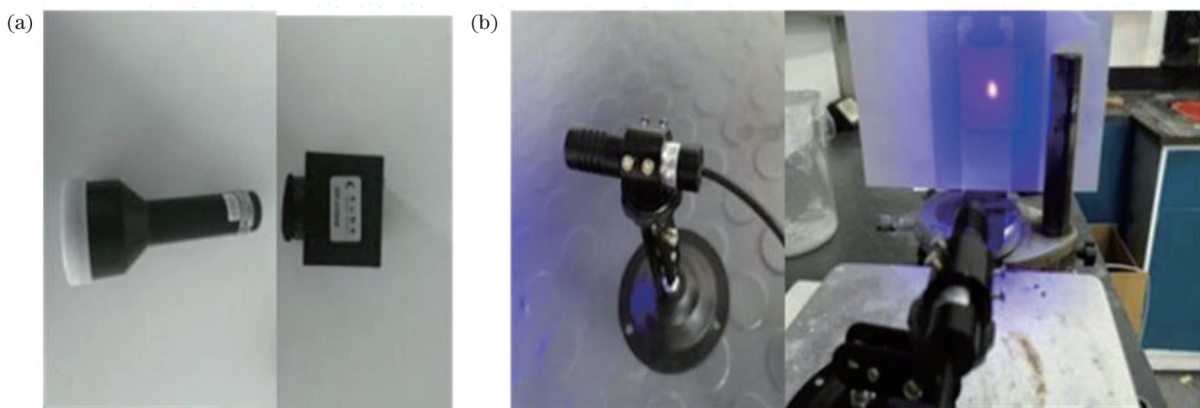


图 21 变形测量系统的搭建。(a) 图像采集系统; (b) 测量光源

Fig. 21 Construction of deformation measurement system. (a) Image acquisition system; (b) measurement light source

4 清洗智能装备技术研究进展

经过多年的追赶,我国在激光清洗基础理论、核心光源等领域已与国外处于并跑阶段,甚至处于领跑阶段,但仍存在智能关键技术薄弱、高端装备不足等问题。在航空航天智能清洗装备方面,如图 22(a)所示,美国并发技术公司(CTC)将激光涂层去除技术与自动化机器人系统相结合,设计研发了RLCRS 除漆系统^[55],用于国防部大型飞机外部件和武器系统的脱漆活动,其每年节省的总运营成本为美国空军带来约 6700 万美元的收益。美国宾夕法尼亚州立大学应用研究实验室设计研究了美国海军自动旋翼桨叶剥离系统(ARBSS)^[56],可实现海空飞机异形面的实时清洗效果检测和精密清洗[图 22(b)]。荷兰 LR Systems BV 公司的激光涂层去除(LCR)机器人^[57]可以在 11 h 内完成 C-130 战机的清洗工作,被认证为全球最大的创

新型激光涂层剥离机器人[图 22(c)]。国内山东省科学院激光研究所针对飞机蒙皮清洗开发了一套自动化装备^[58],目前已联合应用单位开展了试验验证[图 22(d)]。南京集萃激光智能制造有限公司、苏州圣同激光装备有限公司等也提供了激光航空零部件智能清洗解决方案,具有自动对焦、曲面清洗、表面洁净度高等优点。在轨道交通领域,荷兰 Laser Precision Solutions(LPS)公司研制的“激光列车”[图 23(a)]^[59],可以在 60 mile/h(1 mile=1609.34 m)的速度下清除覆盖在铁轨上的树叶、油污等污物,改善铁轨摩擦性能,目前已经应用于英国铁路和纽约北部地铁。中车青岛四方机车车辆股份有限公司率先在我国将激光智能清洗应用到城轨车体中^[60],通过将激光清洗装置置于龙门式数控焊接机器人上,实现了高铁“即清即焊、清焊一体”的高效作业[图 23(b)],目前已在上海、苏州、深圳等地实现应用验证。

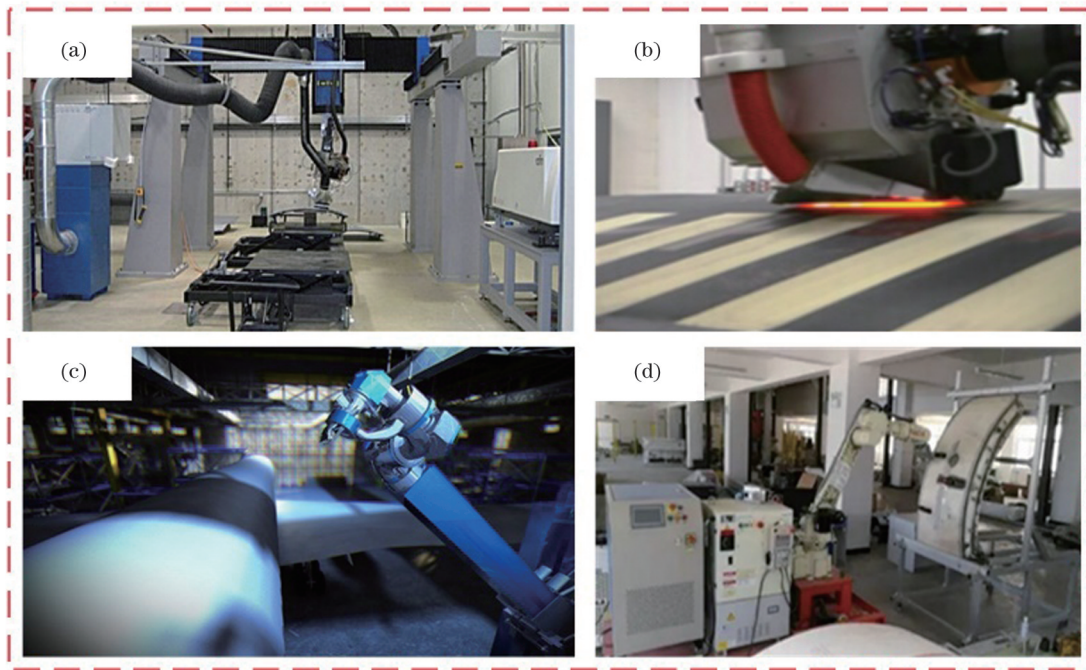


图 22 国内外航空航天智能激光清洗装备^[55-58]。(a)RLCRS;(b)ARBSS;(c)LCR 机器人;(d)自动化装备
Fig. 22 Domestic and foreign aerospace intelligent laser cleaning equipment^[55-58]. (a) RLCRS; (b) ARBSS; (c) LCR robot; (d) automation equipment

在船舶制造方面,德国汉诺威激光中心(LZH)目前开发了一种水下机器人,用来清洁船体[图 24(a)]^[61],该清洗程序利用辐射破坏污垢的细胞,使细胞死亡,从而在一段时间后被水冲走。在国内,中国船舶第七一六研究所通过搭载 2000 W 脉冲激光清洗器^[62],研发了智能爬壁除锈机器人[图 24(b)],已在武昌船舶重工集团有限公司试验中获得成功,改变了国内船舶涂装机器人系统无成熟产品推广的局面。与欧美相比,国内在激光清洗智能选区、路径规划和残留物识别等关键技术研究方面刚刚起步,当前尚处于原理验证阶段。在满足加工工艺要求的情况下,还未实现空间线性移

动和构件表面三维轮廓扫描的同步进行。清洗效率是当前制约激光清洗广泛应用的又一技术瓶颈,与清洗激光源的能量输出直接相关。目前国内大多数振镜扫描式光斑的中间和边缘的能量不均匀,且最小光斑尺寸不可控,从而导致清洗效率不高。

针对海洋船舶、高铁车体、航天钛合金进气道等大型构件的激光清洗需求,多光源复合光路超长线光斑光束整形方法可增大能量输出,是提高清洗效率的有效方法^[1]。如图 25 所示,利用多台激光器进行分束-合束-整形得到的超长线光斑不仅能够满足大型构件的高效清洗要求,还可以提高清洗件表面复杂形貌的适应性。



图 23 国内外轨道交通智能激光清洗装备^[59-60]。(a)激光列车;(b)“清焊一体化”装备

Fig. 23 Intelligent laser cleaning equipment for domestic and foreign rail transit^[59-60]. (a) Laser train; (b) “integrated cleaning and welding” equipment

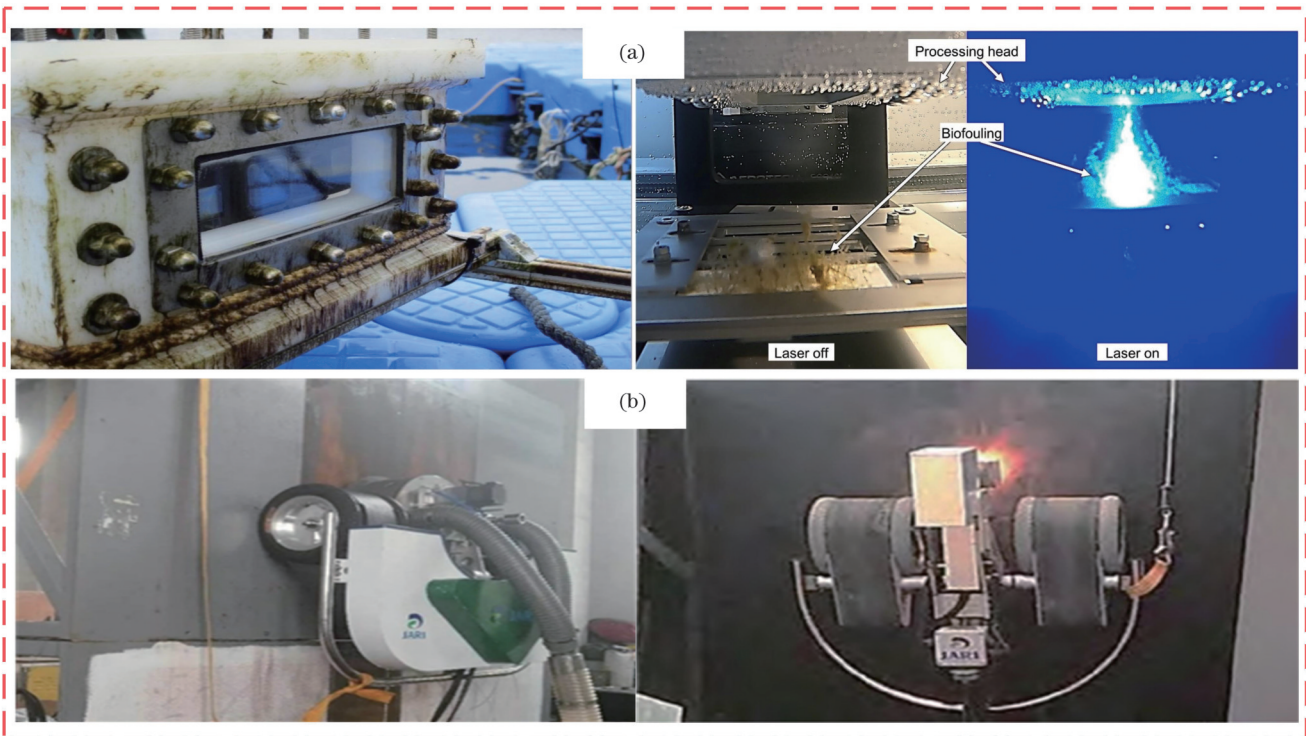


图 24 国内外船舶制造智能激光清洗装备^[61-62]。(a)水下清洗机器人;(b)智能爬壁除锈机器人

Fig. 24 Intelligent laser cleaning equipment for ship manufacturing at home and abroad^[61-62]. (a) Underwater cleaning robot; (b) intelligent wall-climbing rust removal robot

面向大型复杂构件的高效清洗需求,基于非球面光束整形原理,利用光学系统高精度控制光束空间分布,可实现实时大长宽比线光斑输出。增大光束发射方向的焦深方法可适应大范围的清洗表面起伏变化,最终得到的基于多光源复合光路的超长线

光斑激光高效清洗头如图 26(a)所示。因超长线光斑激光高效清洗头的成本通常较高,且对激光器本身的质量要求较高,选择超长振镜式高效清洗工作头[图 26(b)],可用于平面和工件表面起伏不大的曲面清洗。哈尔滨工业大学基于海洋船舶、高铁、核电等

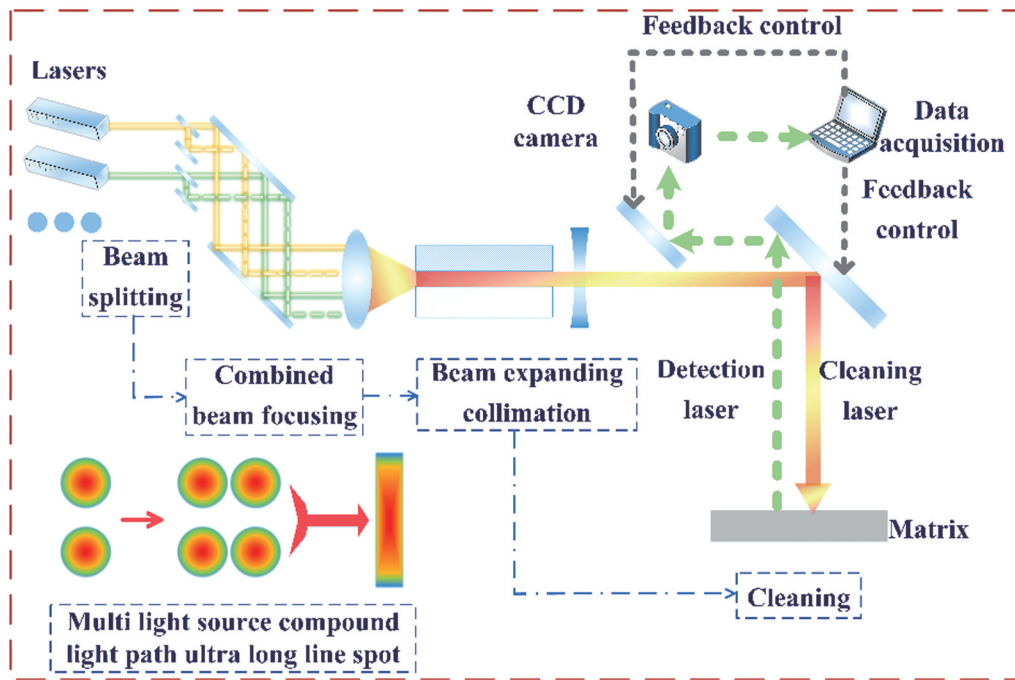


图 25 多光源复合光路超长线光斑光束整形方法^[1]

Fig. 25 Method for shaping ultra-long line spot beams in multiple light source composite optical paths^[1]



图 26 哈尔滨工业大学超长线光斑高效激光清洗装备^[61]。(a)基于多光源复合光路的超长线光斑激光高效清洗头；(b)振镜扫描式超长线光斑激光高效清洗头；(c)面向高铁、海洋大型构件的激光高效清洗应用与装备验证

Fig. 26 Ultra-long line spot efficient laser cleaning equipment of Harbin Institute of Technology^[61]. (a) Ultra-long line spot efficient laser cleaning head based on multi-light source composite optical path; (b) galvanometer scanning ultra-long line spot efficient laser cleaning head; (c) application and equipment verification for efficient laser cleaning of high-speed rail and marine large components

领域中大型构件清洗的要求,集激光器、数控系统、工业机器人、清洗末端执行器、水冷、除尘、安全防护等

系统与装置于一体,在国内首次完成了成套装备的研发^[61]。在大型构件激光清洗成套装备基础上,开展了

船舶舱口盖特征件激光除锈、高铁转向架轮对特征件激光除漆、核电浮桶特征件激光除海洋微生物等清洗工艺的研究与龙门式数控激光清洗成套装备的功能验证[图 26(c)], 提供了面向海洋船舶、高铁等领域中大型构件激光清洗的成套工艺解决方案, 清洗效率超过 $50 \text{ m}^2/\text{h}$ 。

针对激光清洗智能装备当前存在选区关键技术等问题, 面向航天领域重大应用需求, 通过采用“机器人+同轴光学相机”粗精二级定位方法可实现高精度选区定位。进一步通过总控系统搭建柔性机器人及变位机多轴运动系统, 对机器人及扫描振镜进行协调控制, 实现从当前的二维清洗向复杂三维空间曲面清洗的拓展。其主要功能包括功率检测单元、光斑测量单元、图像采集单元、空间形貌采集单元、激光测距单元、光束运动单元、轨迹运动单元、激光控制单元。轨迹运动单元应用在钛合金进气道边缘清洗中, 进气道是一个回转体, 焊前清洗的边缘部分是复杂空间曲面, 机器人和变位机协调运动才能满足清洗需要。机器人智能

柔性清洗装置的运动机构为机器人与变位机, 激光清洗工作头固定在机器人运动轴末端, 进气道固定在变位机上[图 27(a)]。在激光清洗过程中, 对具有激光功率监测与调节、激光光斑尺寸检测与调节及机器视觉选区等功能的机器人智能柔性激光清洗装备进行控制, 使机器人携带的激光清洗工作头与变位机携带的进气道协调运动, 实现对进气道焊接接口的端面、侧面的激光清洗。哈尔滨工业大学郭斌、徐杰团队开发了激光功率监测与调节、激光光斑尺寸检测与调节及机器视觉选区清洗功能的集成技术, 研制了控制系统、机器人运动系统、激光清洗工作头、激光光源及配套夹具集成的机器人智能柔性激光清洗装备[图 27(b)、(c)]^[62-65]。基于激光器输出特性, 提出了不同激光器输出功率偏差的调控策略, 设定功率与测量功率误差小于 1%, 稳定输出了预期清洗功率。关于大型构件的高效激光清洗装备的研究能够为我国激光清洗产业提供独创的新技术, 确保我国在高端制造领域的前沿科学和技术方面的领先地位。

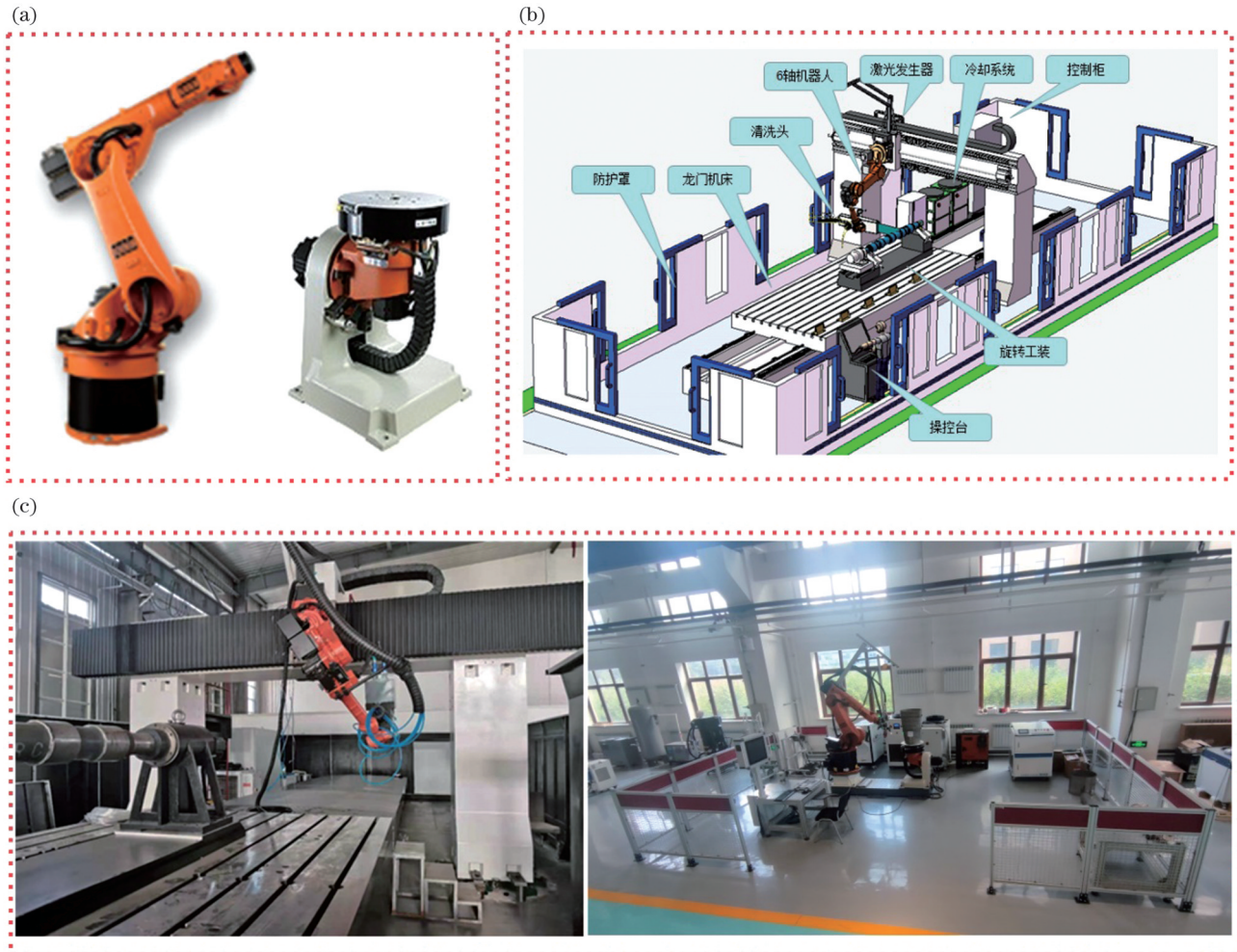


图 27 哈尔滨工业大学机器人智能柔性激光清洗装备^[62-65]。(a)清洗轨迹运动单元;(b)机器人智能柔性清洗装备集成样机;(c)机器人智能柔性清洗装备实物

Fig. 27 Intelligent flexible laser cleaning robot equipment of Harbin Institute of Technology^[62-65]. (a) Cleaning trajectory motion unit; (b) integrated prototype of intelligent flexible cleaning robot equipment; (c) physical object of intelligent flexible cleaning robot equipment

5 展望与挑战

采用激光清洗技术,对于相关使用单位而言,可以极大地提高装备制造水平,保护环境,降低工人劳动强度,会为使用单位带来数千万乃至上亿元的直接经济效益,且创新性的核心技术可推广到相关企业、高校、科研院所中,研究成果的经济效益和社会效益显著。根据激光清洗的不同应用领域进行估算,激光清洗设备的需求量是个庞大的数字。随着国家对再制造行业的高度重视,工程机械、汽车零部件、机床再制造等领域有着巨大的需求,激光清洗设备具有广阔的市场前景。建立典型构件表面污物的激光清洗优化工艺的规范,研制激光清洗过程激光多元参数在线检测系统、机器人智能柔性选区精密激光清洗装备以及大型构件的高效激光清洗装备,将有助于保持我国在前沿激光制造领域的领先地位。当前我国激光清洗设备的市场规模已经超过 600 亿元,未来仍将保持高于 16% 的增长率,激光清洗的未来是光明的,但是目前还存在诸多挑战:

1) 我国激光清洗设备市场尚处于发展初期阶段,至今未形成批量生产,激光产业主要集中在长江三角洲、珠江三角洲等发达地区,存在发展不平衡不充分的现象。相比于低廉的传统清洗方式,核心激光器的价格仍然相对较高,工艺应用不足,难以在广大中小企业中推广。

2) 激光清洗面向的清洗对象众多,每种类型的污物都具有不同的成分、厚度、密度和附着力,需要不同的清洗工艺参数。目前尚缺乏大量清洗对象的激光清洗工艺和评价体系,由此导致难以定量评价激光产生的温度梯度和能量扩散速率,无法准确获得污物的清洗阈值和基体的损伤阈值。

3) 清洗效率是当前制约激光清洗广泛应用的主要因素之一,其与清洗激光源能量输出直接相关。当前固体激光器单脉冲能量输出也未突破 500 mJ,对于飞机、舰船等大型设备的整体表面除漆、除锈清洗,当前激光器还无法超越传统清洗技术的效率。

4) 激光清洗机制尚不明确。激光清洗过程非常复杂,不同对象的材料去除机理不同,光致物理化学效应的耦合作用机制还不清晰,激光清洗跨尺度建模方法还不完善,难以准确模拟和分析激光清洗行为,多场辅助激光清洗方面的研究较少,多场耦合作用的物理机制还需要深入研究。

5) 相比于国外,我国在激光清洗的智能路径规划、选区清洗等方面仍需升级。近期,哈尔滨工业大学新立项的一项国家重点研发计划“大能量高重复频率脉冲激光智能清洗技术与装备”(2022YFB4601500),将有望使我国成为继英国、德国、美国后少数掌握大能量高重复频率纳秒脉冲激光核心技术的国家。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 郭斌,徐杰,苏轩.大能量高重复频率脉冲激光智能清洗技术与装备(特邀)[J].红外与激光工程,2023,52(2):20230073.
Guo B, Xu J, Su X. High energy high repetition rate pulsed laser intelligent cleaning technology and equipment(invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(2): 20230073.
- [3] Zhu G D, Wang S R, Cheng W, et al. Corrosion and wear performance of aircraft skin after laser cleaning[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106475.
- [4] Zhu G D, Wang S R, Zhang M Y, et al. Application of laser cleaning in postwelding treatment of aluminum alloy[J]. Applied Optics, 2020, 59(34): 10967-10972.
- [5] Zhu G D, Wang S R, Cheng W, et al. Investigation on the surface properties of 5A12 aluminum alloy after Nd: YAG laser cleaning[J]. Coatings, 2019, 9(9): 578-593.
- [6] 朱国栋,王守仁,成巍,等.激光清洗在金属表面处理中的应用研究进展[J].山东科学,2019,32(4):38-45,73.
Zhu G D, Wang S R, Cheng W, et al. Advances in the application of laser cleaning to metal surface treatment[J]. Shandong Science, 2019, 32(4): 38-45, 73.
- [7] 谭东晖,陆冬生,宋文栋,等.准分子激光直接清洗硅片上油脂的实验研究[J].激光技术,1995,19(5):319-320.
Tan D H, Lu D S, Song W D, et al. Experiment studies of excimer laser cleaning of grease-contaminated Si substrate[J]. Laser Technology, 1995, 19(5): 319-320.
- [8] 谭东晖,陆冬生,宋文栋,等.激光清洗基片表面温度的有限元分析及讨论[J].华中理工大学学报,1996,24(6):50-53.
Tan D H, Lu D S, Song W D, et al. A finite element analysis of the temperature distribution on a substrate surface during laser cleaning[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1996, 24(6): 50-53.
- [9] 王泽敏,曾晓雁,黄维玲.脉冲激光除漆机理及工艺参数的研究[J].材料保护,2000,33(4):21-22,59.
Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Parameters and mechanisms of paintcoat laser cleaning[J]. Materials Protection, 2000, 33(4): 21-22, 59.
- [10] 史兴宽,徐传义,任敬心,等.光学基片表面镀金薄膜的激光清洗阈值和损伤阈值[J].航空制造技术,2000,43(5):32-34.
Shi X K, Xu C Y, Ren J X, et al. Laser cleaning threshold and damage threshold of gold-plating thin film on optical substrate surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2000, 43(5): 32-34.
- [11] 宋峰,刘淑静,颜博霞.激光清洗:富有前途的环保型清洗方法[J].清洗世界,2004,20(5):43-48,60.
Song F, Liu S J, Yan B X. Laser cleaning[J]. Cleaning World, 2004, 20(5): 43-48, 60.
- [12] 宋峰,刘淑静,牛孔贞,等.激光清洗原理与应用研究[J].清洗世界,2005,21(1):1-6.
Song F, Liu S J, Niu K Z, et al. Principle and application research on laser cleaning[J]. Cleaning World, 2005, 21(1): 1-6.
- [13] 宋峰,刘淑静.激光清洗技术[J].清洗世界,2005,21(2):28-30.
Song F, Liu S J. Laser cleaning technique[J]. Cleaning World, 2005, 21(2): 28-30.
- [14] 宋峰,刘淑静,邹万芳.激光干式清洗[J].清洗世界,2005,21(8):33-35.
Song F, Liu S J, Zou W F. Dry laser cleaning[J]. Cleaning World, 2005, 21(8): 33-35.
- [15] 国务院关于加快发展循环经济的若干意见[J].中华人民共和国国务院公报,2005(23):10-14.
The state council's opinions on accelerating the development of circular economy[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2005(23): 10-14.
- [16] 中华人民共和国循环经济促进法[N].人民日报,2008-09-02(14).
Circular Economy Promotion Law of the People's Republic of

- China[N]. People's Daily, 2008-09-02(14).
- [17] 施建宏, 杜天怡, 马盖明, 等. 全国产化工业光纤激光器实现单纤 22.07 kW 功率稳定输出[J]. 中国激光, 2022, 49(24): 2416003. Shi J H, Du T Y, Ma G M, et al. All-domestic industrial fiber laser realizes stable output of 22.07 kW single fiber power[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(24): 2416003.
- [18] Zhu G D, Wang S R, Cheng W, et al. Corrosion and wear properties of marine aluminium alloy after laser cleaning[J]. Lasers in Engineering, 2021, 4A(6): 1-16.
- [19] 邹涛, 杨和逸, 仇连波. 活络模激光清洗技术的开发应用及发展方向[J]. 橡塑技术与装备, 2023, 49(3): 5-13. Zou T, Yang H Y, Qiu L B. Development, application and development direction of laser cleaning technology for movable die [J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2023, 49(3): 5-13.
- [20] 刘丽飒, 林学春, 宋峰. 激光器工程化与清洗应用中的技术突破(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(2): 20230049. Liu L S, Lin X C, Song F. The technical breakthroughs of kilowatt laser and laser cleaning in engineering application(invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(2): 20230049.
- [21] Nie J H, Zhang H, Zhang D H, et al. Removal mechanism of laser cleaning for inorganic thermal control coatings on aluminum alloys [J]. Applied Surface Science, 2023, 633: 157578.
- [22] Gu J Y, Su X, Jin Y, et al. Precise paint stripping based on photochemical effect by UV laser on honeycomb sandwich panel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 3768-3779.
- [23] Gu J Y, Su X, Jin Y, et al. Towards low-temperature laser paint stripping by photochemical mechanism on CFRP substrates[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 85: 272-280.
- [24] 顾军义, 李文琴, 苏轩, 等. 碳纤维复合材料飞机蒙皮表面漆层激光清洗工艺研究[J]. 中国激光, 2024, 51(12): 1202202. Gu J Y, Li W Q, Su X, et al. Research on laser cleaning process of paint layer on carbon fiber composite aircraft skin[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(12): 1202202.
- [25] Li Z C, Zhang D H, Su X, et al. Removal mechanism of surface cleaning on TA15 titanium alloy using nanosecond pulsed laser[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 139: 106998.
- [26] Li Z C, Xu J, Zhang D H, et al. High-temperature oxidation behaviors of TA15 titanium alloy after mechanical grinding and laser cleaning[J]. Coatings, 2021, 11(9): 1090.
- [27] Li Z C, Chen X, Yang S R, et al. Removal mechanism of liquid-assisted nanosecond pulsed laser cleaning TA15 titanium alloy oxide film[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 4986-4997.
- [28] Zhang D H, Xu J, Li Z C, et al. Removal mechanisms of nanosecond pulsed laser cleaning of blue and red polyurethane paint [J]. Applied Physics A, 2022, 128(2): 170.
- [29] Zhang D H, Xu J, Li Z C, et al. Removal mechanism of blue paint on aluminum alloy substrate during surface cleaning using nanosecond pulsed laser[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 149: 107882.
- [30] Lu Y, Ding Y, Wang M L, et al. An environmentally friendly laser cleaning method to remove oceanic micro-biofoulings from AH36 steel substrate and corrosion protection[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 314: 127961.
- [31] Lu Y, Ding Y, Wang G W, et al. Ultraviolet laser cleaning and surface characterization of AH36 steel for rust removal[J]. Journal of Laser Applications, 2020, 32(3): 032023.
- [32] Lu Y, Ding Y, Wang M L, et al. A characterization of laser cleaning painting layer from steel surface based on thermodynamic model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(5/6): 1989-2002.
- [33] Tian Z, Lei Z L, Chen X, 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.
- [34] Lei Z L, Tian Z, Chen X, et al. Large spot diameter nanosecond laser treatment of aluminum alloy sheets for high-speed superhydrophobic hierarchical micro- and nanostructured surface preparation[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 361: 249-254.
- [35] Tian Z, Lei Z L, Chen Y B, et al. Inhibition effectiveness of laser-cleaned nanostructured aluminum alloys to sulfate-reducing bacteria based on superwetting and ultraslippery surfaces[J]. ACS Applied Bio Materials, 2020, 3(9): 6131-6144.
- [36] Zhou X, Imasaki K, Furukawa H, et al. Simulation study and experiment on laser-ablation surface cleaning[J]. Optics & Laser Technology, 2001, 33(3): 189-194.
- [37] Yue L Y, Wang Z B, Li L. Modeling and simulation of laser cleaning of tapered micro-slots with different temporal pulses[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 533-539.
- [38] Marimuthu S, Mhich A, Molchan I S, et al. Numerical simulation of excimer laser cleaning of film and particle contaminants[J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135(12): 121301.
- [39] Oh B, Lee J W, Lee J M, et al. Numerical simulation of laser shock cleaning process for micro-scale particle removal[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2008, 22(5/6): 635-650.
- [40] Li Z C, Xu J, Zhang D H, et al. Nanosecond pulsed laser cleaning of titanium alloy oxide films: modeling and experiments[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 82: 665-677.
- [41] 李志超, 徐杰, 张东赫, 等. TA15 钛合金氧化膜激光清洗温度场有限元模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(2): 318-332. Li Z C, Xu J, Zhang D H, et al. Finite element simulation of temperature field in laser cleaning of TA15 titanium alloy oxide film [J]. Scientia Sinica: Technologica, 2022, 52(2): 318-332.
- [42] 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.
- [43] 田泽. 铝合金表面海洋微生物膜层激光清洗及生长抑制机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022. Tian Z. Laser cleaning and growth inhibition mechanism of marine microbial film on aluminum alloy surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [44] 郭嘉伟, 蔡和, 韩聚洪, 等. 基于热烧蚀效应的激光清洗仿真模型研究(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(2): 20220779. Guo J W, Cai H, Han J H, et al. Simulation model of laser cleaning based on thermally-induced ablation effects (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(2): 20220779.
- [45] Parandoush P, Hossain A. A review of modeling and simulation of laser beam machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 85: 135-145.
- [46] 李悦, 吴卓颐, 储德谱, 等. 激光清洗监测技术研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(2): 20220784. Li Y, Wu Z Y, Chu D P, et al. Research progress of laser cleaning monitoring technology (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(2): 20220784.
- [47] 侯素霞, 罗积军, 张清华. 激光清洗实时监测技术研究[J]. 光学技术, 2007, 33(S1): 61-62. Hou S X, Luo J J, Zhang Q H. Study on laser cleaning technique [J]. Optical Technique, 2007, 33(S1): 61-62.
- [48] Chen Y, Deng G L, Zhou Q H, et al. Acoustic signal monitoring in laser paint cleaning[J]. Laser Physics, 2020, 30(6): 066001.
- [49] Tserevelakis G J, Pozo-Antonio J S, Siozos P, et al. On-line photoacoustic monitoring of laser cleaning on stone: evaluation of cleaning effectiveness and detection of potential damage to the substrate[J]. Journal of Cultural Heritage, 2019, 35: 108-115.
- [50] Tserevelakis G J, Pouli P, Zacharakis G. Listening to laser light interactions with objects of art: a novel photoacoustic approach for diagnosis and monitoring of laser cleaning interventions[J]. Heritage Science, 2020, 8(1): 1-13.
- [51] Kane D M, Fernandes A J, Mildren R P. Optical microscopy imaging and image-analysis issues in laser cleaning[J]. Applied Physics A, 2003, 77(6): 847-853.

- [52] ShangGuan J F, Tong Y Q, Yuan A H, 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(2): 022009.
- [53] Choi S, Choi J, Park C. Multivariate analysis-based laser-induced breakdown spectroscopy for monitoring of laser paint cleaning[J]. *Applied Physics B*, 2022, 129(1): 8.
- [54] 宋峰, 陈铭军, 陈暄, 等. 激光清洗研究综述(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(2): 20220835.
Song F, Chen M J, Chen X, et al. Review of laser cleaning technology (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(2): 20220835.
- [55] Arthur J, Bowman R, Straw R. Robotic laser coating removal system[R]. Ohio: Environmental Security Technology Certification Program, Air Force Research Laboratory, 2008.
- [56] 华工激光 CN. What? 军用飞机也要洗澡 还得用激光[EB/OL]. [2018-05-03]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1599411339373782195&wfr=spider&for=pc>.
Huangong Laser CN. What? Military planes also need to take showers and use lasers[EB/OL]. [2018-05-03]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1599411339373782195&wfr=spider&for=pc>.
- [57] 江宇宏, 何玉洋, 符永宏, 等. 激光清洗技术规模化应用发展现状(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(2): 20220753.
Jiang Y H, He Y Y, Fu Y H, et al. Development status of large-scale application of laser cleaning technology (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(2): 20220753.
- [58] 强远激光. 激光清洗技术在航空航天领域的应用[EB/OL]. [2022-12-06]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1751453786822499869>.
LaserQiangyuan. The application of laser cleaning technology in the aerospace field[EB/OL]. [2022-12-06]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1751453786822499869>.
- [59] 长三角激光联盟. 激光技术将首次以 60 英里时速进行铁路的清洗维护 [EB/OL]. [2022-09-24]. https://www.sohu.com/a/587536453_100034932.
Yangtze River Delta Laser Alliance. Laser technology will be used for the first time to clean and maintain railways at a speed of 60 miles per hour[EB/OL]. [2022-09-24]. https://www.sohu.com/a/587536453_100034932.
- [60] 中国中车. 高铁清洗智能新装备诞生[EB/OL]. [2023-02-09]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_21864467.
CRRC China. The birth of intelligent new equipment for high-speed rail cleaning[EB/OL]. [2023-02-09]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_21864467.
- [61] 郭斌, 郭鑫民, 徐杰, 等. 一种超长线光斑激光高效清洗装置: CN109465542B[P]. 2020-01-07.
Guo B, Guo X M, Xu J, et al. An efficient laser cleaning device for ultra long line spot: CN109465542B[P]. 2020-01-07.
- [62] 徐杰, 郭斌, 李志超, 等. 一种湿式激光清洗装置及方法: CN110586580B[P]. 2021-04-23.
Xu J, Guo B, Li Z C, et al. A wet laser cleaning device and method: CN110586580B[P]. 2021-04-23.
- [63] 徐杰, 郭斌, 单德彬, 等. 一种抗氧化激光清洗装置: CN109290295B[P]. 2020-11-06.
Xu J, Guo B, Shan D B, et al. An anti oxidation laser cleaning device: CN109290295B[P]. 2020-11-06.
- [64] 徐杰, 李志超, 徐振海, 等. 一种激光清洗实时监测装置及方法: CN110773518B[P]. 2021-01-22.
Xu J, Li Z C, Xu Z H, et al. A real-time monitoring device and method for laser cleaning: CN110773518B[P]. 2021-01-22.
- [65] 郭斌, 徐杰, 李志超, 等. 一种管道内壁的激光清洗装置: CN109047194A[P]. 2018-12-21.
Guo B, Xu J, Li Z C, et al. A laser cleaning device for pipeline inner wall: CN109047194A[P]. 2018-12-21.

Research Progress and Challenges of Laser Cleaning Technology (Invited)

Zhu Guodong^{1,2}, Zhang Donghe^{2,5}, Li Zhichao^{1,3}, Su Xuan⁵, Jin Yang⁴, Xu Jie^{1,3,5*},
Shan Debin^{1,3}, Guo Bin^{1,2,3,4,5}

¹Key Laboratory of Micro-Systems and Micro-Structures Manufacturing of Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China;

²School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

³School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

⁴School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology(Shenzhen), Shenzhen 518055, Guangdong, China;

⁵Laser Manufacturing Research Center, Harbin Institute of Technology, Zhengzhou 450046, Henan, China

Abstract

Significance Laser cleaning is an important laser application and is known as the “most promising green cleaning technology of the 21st century.” It has unique advantages that make it effective in the efficient and precision cleaning of large and complex components. This technology can be used to clean parts that cannot be cleaned using traditional technology, significantly improving the cleaning efficiency and reliability of the product. Although developed countries abroad have performed much work on the basic theory, process exploration, and engineering application of laser cleaning, there are still common problems such as a low component cleaning efficiency, an unclear coupling mechanism, incomplete evaluation standards, and insufficient online monitoring technology. Therefore, researching the basic theory and equipment for efficient laser cleaning is a specific implementation goal of the “Made in China 2025” initiative, which aligns with China’s sustainable development strategy. This will assist in improving the automation level of equipment maintenance in areas such as the aerospace, rail transit, and ocean shipping sectors, and has important significance in promoting the upgrading and optimization of China’s industrial structure.

This study focuses on the significant demand for laser cleaning in the aerospace, high-speed rail, and ocean shipping fields in China. It considers large and complex components such as the TA15 titanium alloy intake ports for the new generation of aerospace solid-liquid ramjet engines, high-speed rail body features or bogie components, and hatch covers in oceangoing ship manufacturing as

research objects. It introduces the research progress of the Harbin Institute of Technology in laser cleaning mechanisms and processes, the online monitoring of multiple parameters during cleaning processes, and intelligent equipment technology in recent years in order to provide valuable references for the sustainable development of intelligent laser manufacturing in China in the future. To overcome the shortcomings of online monitoring technology for laser cleaning at home and abroad, the team of Guo Bin and Xu Jie from the Harbin Institute of Technology established a coupled multivariate rapid identification method for laser cleaning and its key technologies for short-term online regulation. They established a multi-parameter online detection and regulation system based on spectroscopy (Fig. 17), providing technical support for the subsequent development of intelligent, flexible, and selective precision laser cleaning equipment and efficient laser cleaning equipment for large components. This system achieves real-time control of the laser cleaning quality, and the accuracy errors of laser spot size and average power output are better than 1%. The Harbin Institute of Technology has completed the development of a complete set of equipment for large-scale component cleaning in fields that include ocean shipping, high-speed rail, and nuclear power, integrating systems and devices such as lasers, computer numerical control (CNC) systems, industrial robots, cleaning end effectors, water cooling equipment, dust removal equipment, and safety protection devices for the first time in China (Figs. 26 and 27). Based on the complete set of laser cleaning equipment for large components, research has been carried out on laser cleaning processes such as rust removal for ship hatch cover features, paint removal for high-speed rail bogie wheelset features, and the removal of marine microorganisms on nuclear power floating bucket features, as well as functional verification of gantry-type CNC laser cleaning equipment. A complete set of process solutions for the laser cleaning of large components in the ocean shipping and high-speed rail fields has been provided, with a cleaning efficiency exceeding 50 m²/h.

Progress Different methods are involved in the binding of objects such as coatings, dirt, marine microorganisms, and small particles to a substrate, and it is necessary to distinguish and research different physical removal mechanisms based on the physical characteristics of various objects. When cleaning the oxide film on the surface of a titanium alloy inlet, nanosecond pulse laser cleaning can not only completely remove the oxide film on the titanium alloy surface but can also prevent secondary oxidation of the substrate as a result of the low thermal effect characteristics of nanosecond laser, making it an optimal laser cleaning method (Fig. 3). When cleaning a painted high-speed railway aluminum alloy car body, different colors and thicknesses of paint require different laser cleaning methods (Fig. 4). When the paint is thin ($\leq 40 \mu\text{m}$), a laser light source with a lower absorption rate for the paint is selected, and the paint is removed through thermal vibration, which achieves better results. When the paint is thick, it is necessary to choose a laser light source with a higher absorption rate for the paint, and the paint is removed using an ablation mechanism, which is a good choice. For the laser cleaning of high-strength steel hull rust, the main removal mechanism during dry cleaning involves energy absorption by the oxide film and gasification (Fig. 5). When the oxide on the surface undergoes gasification and evaporation, the downward reaction force is generated on the sample surface, making the removal of the deeper oxide film easier. Laser cleaning using a narrow pulse width and high peak power is effective at removing marine microorganisms (Fig. 6). The laser removal mechanisms for the extracellular polymeric substances (EPS) layer and barnacle substrate are ablation gasification and shock wave peeling, respectively. Establishing a cleaning thermal vibration model will assist in better elucidating the change laws of the laser cleaning behavior, temperature field, and stress field with the laser spatiotemporal energy characteristic parameters and predicting the relationship between the different cleaning parameters and cleaning quality in the laser cleaning process. The team of Guo Bin and Xu Jie from the Harbin Institute of Technology established a thermal vibration model using the finite element method to simulate the temperature and stress fields during laser cleaning (Figs. 7–10). The results were compared with experimental results. The final calculation accuracy of the temperature and thermal stress fields exceeded 85%.

Conclusions and Prospects Laser cleaning technology can significantly improve equipment manufacturing, protect the environment, and reduce labor requirements. It will bring users direct economic benefits of tens of millions or even billions of yuan. Moreover, innovative core technologies can be promoted by appropriate enterprises, universities, and research institutes, with significant economic and social benefits. The different application fields for laser cleaning lead to a significant demand for laser cleaning equipment. Domestically, much attention is being given to the remanufacturing industry, including a massive demand for engineering machinery, automotive parts, and machine tool remanufacturing. Thus, laser cleaning equipment has broad market prospects. Establishing optimization process specifications for the laser cleaning of typical component surface contaminants, developing a laser multi-parameter online detection system for the laser cleaning process, selecting intelligent and flexible robots for precision laser cleaning equipment, and developing efficient laser cleaning equipment for large components will assist in maintaining China's leading position in the field of innovative laser manufacturing.

Key words laser technique; laser cleaning; cleaning mechanism; intelligent selection area; engineering application