

工业领域的激光清洗技术

雷正龙, 田泽, 陈彦宾*

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 激光清洗技术采用短脉冲激光对材料表面进行快速清洁,在工业制造、生产和维修等领域具有广泛的应用前景。介绍了激光烧蚀清洗、液膜辅助式激光清洗和激光冲击波式清洗三种典型的激光清洗方法,并综述了激光清洗技术的国内外研究现状。根据清洗材料本身的特点,列举了激光清洗技术的典型应用,并展望了其在国内制造业的发展方向。

关键词 材料;激光清洗技术;清洗方法;清洗对象;工业应用

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030005

Laser Cleaning Technology in Industrial Fields

Lei Zhenglong, Tian Ze, Chen Yanbin

State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The laser cleaning technology with the use of short pulsed lasers on material surface for a rapid cleaning has a broad application prospect in the industrial fields of manufacturing, production and repairing, and so on. Three typical laser cleaning methods of laser ablation cleaning, liquid film assisted laser cleaning, and laser shockwave cleaning are introduced. The research status at home and abroad of laser cleaning technology is reviewed. Some representative applications of laser cleaning technology are listed based on the own characteristics of cleaning materials, and their development directions in the domestic manufacturing are prospected.

Key words materials; laser cleaning technology; cleaning method; cleaning objects; industrial applications

OCIS codes 160.3380; 140.3390; 350.3390; 140.3538

1 引言

1969年, Beadair等^[1]首次提出激光清洗的概念。激光清洗技术具有清洗效果佳、应用范围广、精度高、非接触式和可达性好等优势,与清洗剂、超声波和机械方式的清洗方法形成鲜明对照^[2-6],其有望部分或完全替代传统清洗方法,成为21世纪最具发展潜力的绿色清洗技术^[7]。激光清洗最早可追溯到20世纪60年代^[8],但对这种创新型清洗技术的研究和应用是从20世纪90年代才开始逐步发展的^[9-10]。近几年,激光清洗成为了工业制造领域的研究热点之一,研究内容涵盖工艺、理论、装备及应用,但国内在激光清洗装备和应用方面的整体水平

与国外的差距较大。

在工业应用领域,随着激光器的高速发展,学者们对激光清洗机理的研究不断深入,表面质量的监测与表征方法日趋完善,激光清洗材料表面的质量得到提升,清洗精度和效率也逐渐增加。激光清洗技术已能可靠地清洗大量不同的基材表面,清洗对象包括钢、铝合金、钛合金、玻璃和复合材料等,应用行业覆盖航天、航空、船舶、高铁、汽车、模具、核电和海洋等领域。本文首先介绍了三种典型的激光清洗方法,然后综述了近年来基于不同材料的激光清洗的研究现状,最后列举了一些国内外激光清洗技术的典型应用,为科研人员开展相关研究提供参考。

收稿日期: 2017-08-11; 收到修改稿日期: 2017-09-24

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFB1105000)

作者简介: 雷正龙(1977—),博士,副教授,主要从事激光焊接与激光清洗方面的研究。E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: chenyb@hit.edu.cn

2 激光清洗方法

激光清洗过程十分复杂,涉及材料去除机理的种类繁多,对于某一种激光清洗方法,清洗过程中可能同时存在多种机理,这主要归因于激光与材料之间的相互作用,包括材料表面发生的烧蚀、分解、电离、降解、熔化、燃烧、气化、振动、飞溅、膨胀、收缩、爆炸、剥离、脱落等物理化学变化过程。目前,典型的激光清洗方法主要有三种:激光烧蚀清洗、液膜辅助激光清洗和激光冲击波式清洗方法。

激光烧蚀清洗方法的机理主要有热膨胀、气化、烧蚀和相爆炸等,示意图如图 1 所示,激光直接作用于基材表面待去除的材料上,环境条件可以为空气、稀有气体或真空。当激光辐照在材料表面时,基体和清洗物均先发生热膨胀。随着激光与清洗物相互作用时间的增加,如果温度低于清洗物的气化阈值,则清洗物仅发生物理变化过程,清洗物与基体热膨胀系数之间的差异导致界面处产生压力,清洗物发生屈曲、从基材表面撕开,裂纹产生,出现机械断裂、振动破碎等现象,清洗物以喷射方式被去除或被剥离基材表面。如果温度高于清洗物的气化阈值温度,会出现以下两种情况。当清洗物的烧蚀阈值小于基材的时,需调整激光能量密度使其处于清洗物与基材的烧蚀阈值之间,此时既可以有效去除清洗物,又不会对基材造成损伤,如 Marimuthu 等^[11]采用脉冲激光剥离 WC 刀头表面的 TiN 涂层,将激光能量密度确定为 2 J/cm^2 ,满足了既大于 TiN 涂层的清洗阈值(1.62 J/cm^2)又小于基材 WC 的清洗阈值(2.36 J/cm^2)的条件。当清洗物的烧蚀阈值大于基材的时,无法避免对基材的损伤,需控制参数,尽量将损伤降至最低。Yue 等^[12]研究了激光烧蚀去除钛合金表面 α 相的形貌特征,发现钛合金的清洗

阈值为 0.7 J/cm^2 , α 相的清洗阈值为 1 J/cm^2 。这两种情况下清洗物均发生熔化、气化和烧蚀等物理化学变化,清洗机制比较复杂,除了热效应以外,还可能包括清洗物与基材之间的分子键断裂、清洗物的分解或降解、相爆炸、清洗物气化瞬间发生电离、产生等离子体等。

液膜辅助式激光清洗去除材料的机理主要有液膜沸腾气化和振动等,示意图如图 2 所示,将液膜(水、乙醇或其他液体)预先覆盖在清洗物表面,然后用激光对其进行照射。液膜吸收激光能量致使液态介质发生强力爆炸,爆炸的沸腾液体高速运动,将能量传递给表层清洗物,高瞬态的爆炸性力量足以去除表面污物以达到清洗目的。如 She 等^[13]用体积分数为 8% 的丙醇和体积分数为 92% 的水作为薄层液膜,辅助激光去除了 NiP 硬磁盘基材表面直径为 300 nm 的 Al_2O_3 污染微粒。

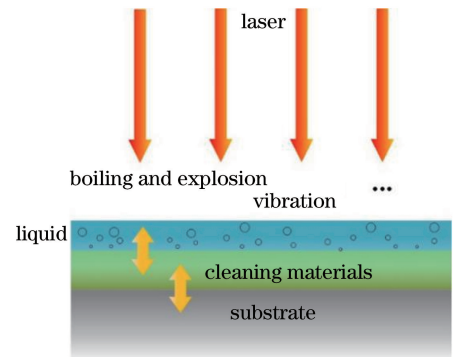


图 2 液膜辅助式激光清洗的工艺示意图

Fig. 2 Process diagram of liquid film assisted laser cleaning

激光冲击波式清洗方法的工艺方式和机理与前两者的有很大不同,其工艺过程如图 3 所示,机理主要为冲击波力去除,清洗对象主要为微粒。激光以平行于基材表面的方向射出,与基材不发生接触,二者之间距离很小。移动工件或激光头将激光焦点调整至微粒附近,激光输出后,焦点处空气会发生电离现象,产生冲击波,冲击波以圆球状迅速膨胀扩大,

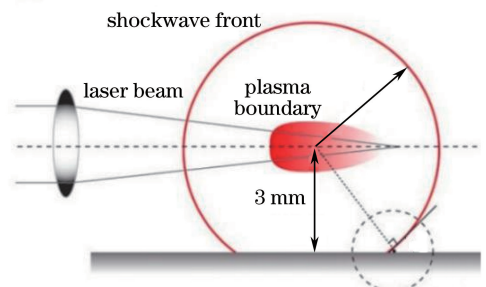


图 3 激光冲击波式清洗的工艺示意图^[14]

Fig. 3 Process diagram of laser shockwave cleaning^[14]

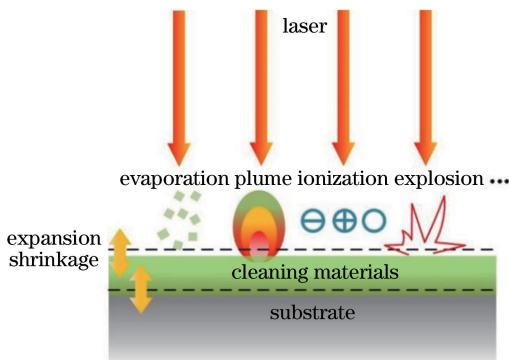


图 1 激光烧蚀清洗方法的工艺示意图

Fig. 1 Process diagram of laser ablation cleaning

并延伸至与微粒发生接触。当冲击波作用在微粒上的横向分量的力矩大于纵向分量及微粒粘附力的力矩时,微粒发生滚动去除。如 Kim 等^[14]利用激光冲击波式清洗方法去除了镀金 K9 玻璃表面直径为 15 nm 的 SiO₂ 微粒。

在以上三种方法中,激光烧蚀清洗方法的操作条件简单,使用最为广泛,选择合适的激光器类型、采用优化的工艺参数可去除各种涂层、油漆、颗粒或污物。液膜辅助式激光清洗方法在使用时需要选择合适的激光波长,液膜对激光的吸收率越大则优势越明显。液膜辅助式激光清洗在某种程度可弥补激光烧蚀清洗过程中冲击压力的不足,可用于去除一些比较难去除的清洗对象,但这种方法存在两个缺点,一是工艺麻烦,过程难以控制;二是由于使用了液膜,清洗完后基材表面的化学成分容易改变,生成新物质。激光冲击波式清洗方法主要用于去除微粒(亚微米级或纳米级),但是针对涂层的清洗还未见报道,该方法对工艺要求非常严格,既要保证能够电离空气,又要使激光与基材之间保持合适的距离,确保作用在微粒上的冲击力足够大。

3 基于不同清洗对象的激光清洗研究现状

1975 年,科研人员使用激光清洗了海面的漂浮石油。1982 年,科学家采用 20 W 连续 CO₂ 激光清洗了柏油路面的燃料斑和油斑。传统的超声波、化学、机械清洗方法均无法解决颗粒与基材之间巨大的吸附力问题,1980 年之后,随着微电子领域的高速发展,针对微粒的激光清洗技术也得到了快速发展。1995 年之后,出于环保和可持续发展的考虑,一些传统的污染环境的化学剂被禁用,由于激光清洗技术具有绿色环保的优势,其得到了高速发展,美国、德国和日本等国家的学者均开展了飞机脱漆的研究。20 世纪 90 年代,IBM 公司的研究人员通过激光烧蚀清洗和液膜辅助式清洗方法去除了光掩刻膜表面的吸附颗粒,并成功实现了激光清洗技术在微电子器件制造过程中的产业化应用。进入 21 世纪后,激光清洗技术得到了更加全面的发展,其应用几乎可以涵盖整个工业领域,清洗范围十分广泛,相关检测技术的开发也得到迅速发展。

近十年国内外激光清洗研究小结见表 1。从现阶段研究来看,相对比较成熟的研究主要集中在钢材除锈、轻质合金表面除氧化膜,此外,研究范围还扩大至复合材料的表面漆层和有机物等污物的清

洗、核电装置内部核微粒、镀膜玻璃表面微小颗粒的清洗以及其他耐高温、耐腐蚀和耐磨损涂层的清洗,但是对硅片表面激光清洗的研究主要集中在 2010 年以前。激光清洗对象包括基材与清洗物,基体材料涵盖钢、铝合金、钛合金、铜、镍基合金、混凝土砖块、硅晶元、碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)、有机玻璃和钨带等,清洗物囊括漆层、锈蚀、氧化层、硫化层、耐磨耐高温涂层、油污、UO₂ 核微粒、SiO₂ 微粒、C 微粒、W 微粒和各种有机物等,下面根据不同的基材种类对激光清洗的研究进展进行分类介绍。

3.1 钢

工业中钢材的应用最为广泛,如汽车焊装、船舶制造涂装和涡轮叶片制造等,使用激光清洗技术可以去除钢制零部件表面的铁锈、油漆和污物,从而保证焊接质量和喷漆效果。

Li 等^[15]采用脉宽为 100 ns 的光纤激光,剥离了热压成型(HPF)钢板表面 20~30 μm 厚的 Al-Si 涂层,并研究了纳秒激光参数对清洗效果的影响,建立了烧蚀孔的深度与脉冲频率和脉冲数量之间的关系。试验清洗一个固定点,而没有对整个面进行剥离,得到 Al-Si 涂层的烧蚀阈值约为 4.4 J/cm²,此时脉冲频率必须大于 5 kHz,去除材料的机理主要为材料气化和相爆炸,图 4 所示为清洗机理示意图。Windmann 等^[16]采用脉宽为 100 ns 的 Nd:YAG 激光清洗和喷砂后处理的方法,去除了 22MnB5 钢的铝基和锌基涂层表面的氧化物和脆性相,为后续钢板和 AA6016 铝合金的激光熔钎焊提供了良好的预处理表面,改善了填充焊料的粘附力,获得的搭接接头强度为 210~330 MPa。陈曦等^[17]借助高速摄像系统,观察研究了 30 ns 脉宽激光清洗热成型钢板表面 40 μm 厚 Al-Si 涂层的过程,分析得到涂层的剥离机理包括涂层在激光辐照下的熔化和气化、涂层与基体之间的热膨胀差异和等离子体冲击波力去除等。

高雯雯等^[18]采用波长为 532nm 的纳秒激光,清洗了 304 不锈钢表面的红棕色锈蚀物(主要成分为 Fe₂O₃),研究了功率、扫描次数和扫描速度对清洗效果的影响,获得的优化工艺参数为功率 26 W,扫描次数 45,扫描速度 100 mm/s。Tang 等^[19]采用脉宽为 200 ns 的光纤激光,开展了清洗 FV(420)B 不锈钢表面硫化层的研究,上层硫化层的清洗阈值约为 0.41 J/cm²,下层硫化层的清洗阈值为 8.25 J/cm²,基体的清洗阈值为 9.90 J/cm²。激光清洗后试样表面的粗糙度由 1.270 μm 减小至

0.391 μm 。Ahn 等^[20]证实,使用波长 248 nm 的紫外光和波长 1064 nm 的红外光均可以有效去除碳钢、不锈钢和铜表面的润滑油。表面损伤的阈值始终大于清洗油污的阈值,因此激光清洗提供了一种“自截止”的清洗工艺。清洗油膜工艺的物理机制很大程度上依赖于油膜的光学特性、厚度和激光能量密度。当透明油膜的厚度小于 10 μm 时,激光辐照会使油

膜-基体的界面处发生爆炸性气化,油膜产生的动量可以一次性去除整个油膜。D'Addona 等^[21]使用激光清洗工艺对船用碳钢板进行了焊前表面清洗,脉冲宽度为 50 ns,清洗物为 20~25 μm 厚的防锈底漆,研究表明,通过增大平均功率或者增加激光光源的方式可以将激光清洗的工作速度提高至 1000 mm/min。

表 1 近十年国内外激光清洗研究小结

Table 1 Research summary of domestic and overseas laser cleaning in recent decade

Substrate	Cleaning material	Laser	Year
HPF steel	Coating	Pulsed fiber laser (1064 nm)	2017 ^[15]
		Nd:YAG laser (1064 nm)	2016 ^[16-17]
Stainless steel	Rust	Pulsed green laser (532 nm)	2016 ^[18]
	Coating	Pulsed fiber laser (1064 nm)	2015 ^[19]
	Oil, lubricant	Nd:YAG laser (1064 nm)	2012 ^[20]
Carbon steel	Paint	Pulsed fiber laser (1064 nm)	2015 ^[21]
	Rust	Pulsed fiber laser (1064 nm)	2014 ^[22-25]
Hot rolled steel	Rust	Nd:YAG laser (1064 nm)	2013 ^[26]
		Pulsed fiber laser (1064 nm)	2016 ^[27-28]
	Paint	Pulsed fiber laser (1064 nm)	2017 ^[29]
Aluminum alloy	Particle, oxide film	Pulsed fiber laser (1064 nm)	2015 ^[30]
		Nd:YAG laser (532 nm)	2016 ^[31]
	Coating, lubricant	Nd:YAG laser (1064 nm)	2014 ^[32]
	Surface of substrate	Nd:YAG laser (1064 nm)	2016 ^[33]
Titanium alloy	Coating	Pulsed fiber laser (1064 nm)	2015 ^[34]
		Femtosecond laser (800 nm)	2013 ^[35]
	Oxide film	Excimer laser (248 nm)	2012 ^[12,36]
Glass	Film	Pulsed fiber laser (1064 nm)	2010 ^[37]
		Nd:YAG laser (1064 nm, 532 nm)	2013 ^[38]
	Particle, oil	Nd:YAG laser (1064 nm, 532 nm)	2014 ^[39]
		Nd:YAG laser (1064 nm, 532 nm)	2011 ^[40]
CFRP	Contaminants, epoxy resin	CO ₂ laser (10.6 μm)	2012 ^[41]
		Femtosecond laser (1024 nm)	2017 ^[42]
		Excimer laser (308 nm)	2016 ^[43]
		Pulsed CO ₂ laser (10.6 μm)	2016 ^[44]
		UV laser (308 nm), NIR laser (1064 nm)	2013 ^[45]
HIPS	Paint	TEA-CO ₂ laser (10.6 μm)	2007 ^[46]
Si wafer	Particle	Nd:YAG laser (1064 nm)	2014 ^[47]
		XeCl excimer laser (308 nm)	2009 ^[48]
		Nd:YAG laser (1064 nm)	2009 ^[14,49]
Nickel-based superalloy AM1	Surface of substrate	Nd:YAG laser (1064 nm)	2007 ^[50]
Tungsten ribbon	Oxide film	Diode-pumped solid-state laser (532 nm)	2005 ^[51]
Brass rings	Coating	Nd:YAG laser (1064, 532, 355 nm)	2016 ^[52]
		Pulsed fiber laser (1064 nm)	2014 ^[53]
			2014 ^[54]

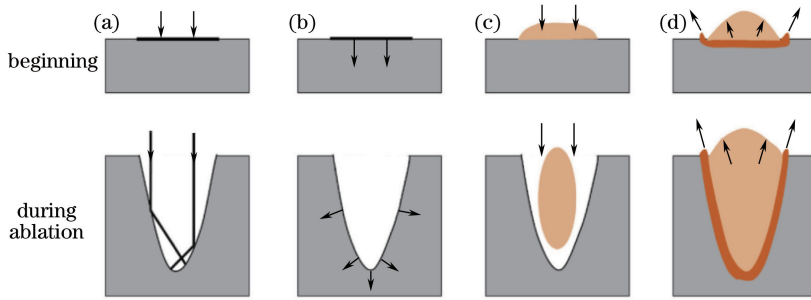


图4 Al-Si涂层单点激光清洗工艺示意图。(a)能量耦合;(b)热传导;(c)等离子体屏蔽;(d)材料驱逐^[15]

Fig. 4 Process diagrams of single spot laser ablation cleaning of Al-Si coating. (a) Energy coupling; (b) heat conduction; (c) plasma shielding; (d) material expulsion^[15]

佟艳群等^[22]开展了脉冲激光去除碳钢表面金属氧化物的研究,发现锈蚀层的激光去除阈值为 0.65 J/cm^2 ,激光烧蚀的机理包括物理化学效应和弹性振动效应,激光能量密度不同,两种效应对清洗机理的影响程度不同,发现了激光诱导等离子体冲击波在材料中的阻尼震荡传播规律,并搭建了激光清洗过程的在线监测系统,建立了氧化物去除度和等离子体发光强度、声波持续时间之间的关系。俞鸿斌等^[23]使用脉宽为 $8 \mu\text{s}$ 的光纤激光去除碳钢表面的铁锈,发现脉冲激光除了能够完全去除表面锈蚀物外,还可以在基材表面形成很薄的硬化层,硬化层可以有效地提高碳钢表面的硬度,起到表面强化的作用,在一定程度上保护了碳钢。李伟等^[24]提出了一种低于气化阈值的激光除锈的分层模型,第一层为表面,当表面温度达到氧化铁的分解温度时,通过熔化解离机制实现剥离;较深层(第二层)的温度较低,在激光作用下虽然不能直接发生分解,但是激光通过加热锈层内部空隙的空气,使空气迅速膨胀,将周围的锈蚀层打碎,去除机制为相爆炸;当锈蚀层厚度小于热扩散深度时,一部分激光能量能够直接传导至基体处被基体吸收,此时的去除机理为基体的热弹性膨胀,剩余锈层被一次性去除。借助ANSYS软件进行模拟分析,发现第二层的相爆炸机制为主要的清洗机制。沈全等^[25]研究了不同的激光工艺参数对激光除锈后基材表面粗糙度的影响规律,发现基材的表面粗糙度随激光功率的增大而增大,随扫描总次数的增大而增大,随扫描速度的增大而减小。张署光等^[26]采用监测激光等离子体光强度的方法,确定了激光除锈阈值并可判断表面锈蚀是否除净。这种实时监测技术将光信号转换为电压信号,得到了电压信号随激光工艺参数的变化曲线并实现了监测,但是这种方法只适用于单点激光照射,并不适用于连续激光照射,因此实现实际应用

还要进一步完善技术。

解宇飞等^[27-28]展开了针对船舶AH32钢材表面的激光除锈研究。结果发现,当激光的能量密度范围为 $0.5 \sim 5 \text{ J/mm}^2$ 时,可以使钢板表面的粗糙度达到 $7 \sim 30 \mu\text{m}$,防腐性能达到传统喷砂除锈的工艺指标,满足实际应用标准。此外,激光除锈后钢板表面的力学性能与基材的相当,显微组织分析结果表明,除锈后钢板表面形成了马氏体,表面的力学性能得到提高。

3.2 铝合金

Jasim等^[29]利用脉宽为 250 ns 的脉冲光纤激光,进行了ENAW 5005A铝合金表面激光去除 $20 \mu\text{m}$ 厚高透明聚合物漆的工艺研究,研究了激光能量、脉冲频率和搭接率对烧蚀尺寸、烧蚀深度、表面形貌和表面粗糙度的影响。研究表明,在优化的工艺条件下,每分钟清洗掉的漆层面积为 11.7 cm^2 ,当激光功率为 1 kW 时,每分钟清洗掉的漆层体积为 2.9 cm^3 ,完全脱漆后基材的表面粗糙度 R_a 为 $1.3 \mu\text{m}$ 。此外,他们还利用光电二极管光谱仪实现了对加工深度的快速在线监测,防止基体受到进一步损伤。图5所示为不同脉冲频率下光谱总强度 I_{total} 随加工深度 h 的变化,由拟合曲线可以看

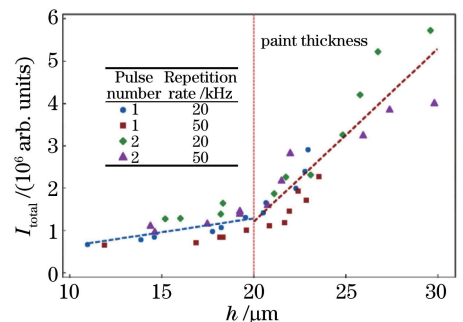


图5 光谱总强度随加工深度的变化^[29]

Fig. 5 Total emission intensity as a function of depth of processing^[29]

出,当 $h = 20 \mu\text{m}$ 时,即漆层厚度刚好被去除,光谱总强度出现一个明显的斜率变化的点,因此由光谱总强度可以判定脱漆是否完全。

朱伟等^[30]采用脉宽为 $10 \mu\text{s}$ 、重复频率为 40 kHz 的脉冲光纤激光器,去除了 6005A 铝合金平板基材表面的快干热塑性丙烯酸气雾漆,脱漆后发现表层的显微硬度值由 90 HV 增大至 170 HV ,这说明激光清洗技术不仅能达到理想的脱漆效果,还能够提高基材表面的力学性能,表面力学性能的研究结果与刘洪伟等^[28]的研究结果类似。

Wang 等^[31]为了提高 3 mm 厚 5A06 铝合金非熔化极稀有气体钨极保护焊(TIG)的焊接质量,对比了脉宽为 10 ns 、重复频率为 10 kHz 、波长为 532 nm 的 Nd:YAG 激光清洗和机械打磨这两种焊前处理工艺的清洗质量。借助扫描电子显微镜

(SEM)观察和氧元素面扫描分析,发现与机械打磨相比,激光清洗后的焊缝区不存在气孔且氧含量显著减小;此外,在激光清洗期间,表面薄层的热熔化可以细化焊缝区的显微组织。

Alshaer 等^[32]研究了超短脉冲 Nd:YAG 激光对 AA6014 铝合金激光焊接接头和卷对接接头内部气孔的形成和数量的影响,使用的激光清洗工艺参数为脉宽 100 ns 、重复频率 20 kHz 、输出功率 600 W 、扫描速度 95 mm/s 。发现激光清洗可以去除铝合金基体表面大部分的润滑油和污染物,使用上述的工艺参数可以去除约 $19 \mu\text{m}$ 厚的污物,且对于搭接和卷对接这两种接头,激光清洗可将接头内部的气孔率减小至 1% 以下,进而显著提升接头质量,图 6 所示为激光清洗前后材料表面的断层扫描图,可知激光清洗后表面粗糙度明显减小。

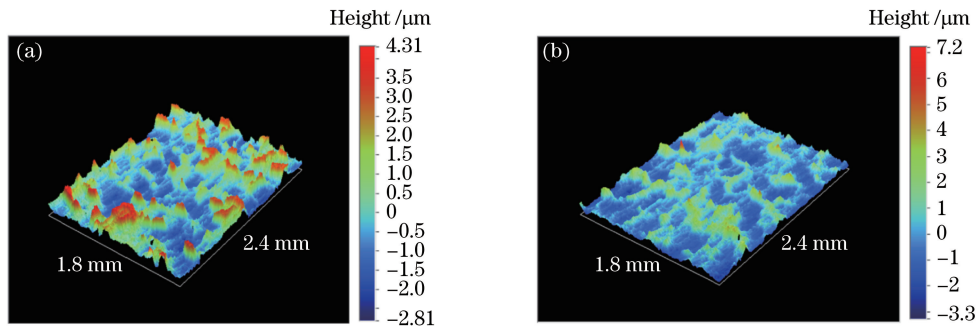


图 6 材料的表面的 X 射线断层扫描图。(a)激光清洗前;(b)激光清洗后^[32]

Fig. 6 X-ray tomography of material surface. (a) Before laser cleaning; (b) after laser cleaning^[32]

激光清洗技术除了可以应用于铝合金焊前表面的清理,还可以用于铝合金胶接前的表面处理。Wu 等^[33]利用脉宽为 200 ns 的 Nd:YAG 激光,对 AA6022 铝合金基材进行了胶接前的表面清洗,研究发现,当激光能量密度为 19.01 J/cm^2 时,胶接接头的剪切强度可以增大 25% ;当激光能量密度小于 4.09 J/cm^2 时,激光清洗可以完全去除表面的油脂和污物,但不会影响材料的表面粗糙度和表面积。使用较高能量密度可以增大表面粗糙度和表面积,这对接头剪切强度的增大是有益的。Mandolino 等^[34]也开展了类似的研究,对比了低压等离子体处理和激光清洗两种工艺对胶接接头剪切强度的影响,结果表明,激光清洗处理的试样平均剪切强度为 19.35 MPa ,较等离子体处理的增大了约 5 MPa 。

3.3 钛合金

Ragusich 等^[35]为了剥离航天钛合金零件表面

$20 \mu\text{m}$ 厚的 TiAlN 耐腐蚀涂层,对比了飞秒 Ti:Sapphire 激光和纳秒准分子激光清洗涂层的工艺,并提出了通过检测等离子体光谱中的化学成分来实时监测激光清洗工艺过程的方法。涂层的烧蚀阈值分别为 0.63 J/cm^2 和 1.72 J/cm^2 ,飞秒激光清洗前后表面粗糙度变化不大,均约为 $1 \mu\text{m}$;纳秒准分子激光清洗后表面粗糙度增大且有氧化现象发生,但是烧蚀率大,相比之下纳秒激光更适合于剥离 $20 \mu\text{m}$ 厚的涂层。

Yue 等^[36]探索了脉宽为 15 ns 的准分子激光去除 TC4 基材表面脆性 α 相层的可能性和工艺特性,确定了 α 相的材料去除率、烧蚀率和烧蚀阈值,重点研究了不同烧蚀深度下材料表面裂纹的宽度和密度,根据表面粗糙度和裂纹宽度的变化建立了经验公式来预测 α 相层的厚度,图 7 所示为激光清洗后材料横截面的宏观形貌和不同烧蚀深度下样品的示意图。

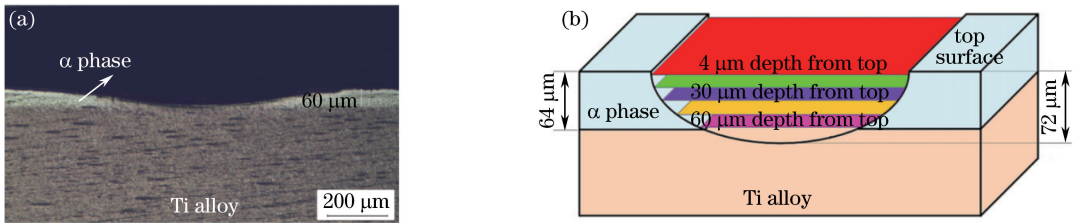


图 7 (a)当激光能量密度为 6.1 J/cm^2 时,900 次激光脉冲辐照后的材料横截面形貌;(b)激光辐照后样品截面结构示意图^[36]

Fig. 7 (a) Cross-sectional morphology of material after 900 pulses of laser irradiation with a laser energy density of $6.1 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$; (b) structural diagram of cross section of sample after laser irradiation^[36]

Kumar 等^[37]采用脉宽为 50 ns 的光纤激光对外径为 9.5 mm 的 Ti-3Al-2.5V 管材的接口处进行了焊前清洗。激光器固定不动,管材倾斜 45° , 旋转速度为 $4^\circ/\text{s}$, 线速度为 2.5 mm/s, 光斑尺寸为 $430 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。优化的工艺参数为脉冲频率 80 kHz, 激光能量密度 0.64 J/cm^2 , 此时材料深度为 $2 \mu\text{m}$, 每分钟清洗的面积为 10 mm^2 。有无焊前激光清洗的接头 X 射线照片如图 8 所示, 可明显观察到激光清洗后接头内部不存在白色小气孔, 而未经激光清洗的接头存在大量的小气孔。

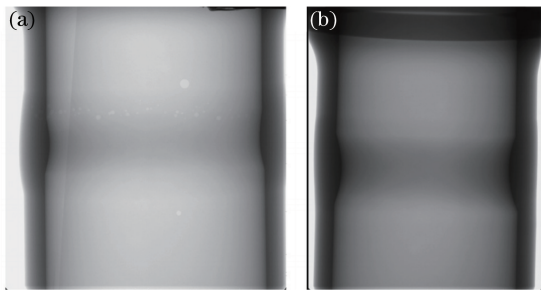


图 8 焊缝的 X 射线照片。(a)焊前未经激光清洗的接头;(b)焊前激光清洗的接头^[37]

Fig. 8 X-ray photos of weld. (a) Joint without any cleaning before welding; (b) joint with laser cleaning before welding^[37]

3.4 玻璃

Uccello 等^[38]利用脉宽为 5~7 ns、重复频率为 10 Hz 的调 Q 的 Nd:YAG 激光,清洗了托克马克装置中第一批镜子(FMs)表面的碳污染的铯膜层。结果表明,当激光脉冲数量为 3000 时,铯薄膜的激光损伤阈值在 $400 \sim 550 \text{ mJ/cm}^2$ 区间,证实了激光清洗方法可以有效去除 FMs 的表面碳污物,并预测此方法可应用至其他薄膜。

Kumar 等^[39]利用脉宽为 6 ns 的调 Q 的 Nd:YAG 激光冲击波,清洗了玻璃表面的 UO_2 颗粒,利用光束偏转技术测量了冲击波速率,He-Ne 激光的光束方向垂直于 Nd:YAG 激光的光束方向。

试验后发现,颗粒的去除效率依赖于激光焦点与基体表面之间的距离、激光脉冲能量和数量,控制激光焦点与基体表面之间的距离为若干毫米,4 次激光冲击处理后,单位表面面积内粒子数分数为 99% 的 UO_2 颗粒被清洗掉。

Ye 等^[40]利用脉宽为 10 ns 的调 Q 的 Nd:YAG 激光冲击波,去除了 K9 玻璃表面 $2 \mu\text{m}$ 厚金膜表面的直径约为 15 nm 的 SiO_2 颗粒。结果表明,对于单脉冲激光波,去除率可以大于 90%,并通过理论模拟计算,得到了与试验结果相同的结论,证实激光清洗方法可以用于清洗镀金层光学元件如反射器和光栅等表面的污物。Ye 等^[41]还开展了去除光学元件表面油脂的研究,使用的激光器是波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光器,结果表明,可以通过烧蚀气化的方式去除油污,且对 K9 玻璃表面的金膜无损伤。

3.5 复合材料

Oliveira 等^[42]利用波长为 1024 nm、脉宽为 550 fs 的飞秒激光对 CFRP 进行了表面处理,去除了部分树脂材料,改变了复合材料的表面形貌和粗糙度,增大了 CFRP 的胶接强度。结果表明,复合材料的整体表面积显著增大,胶接材料之间的界面面积增大,因此胶接强度得到增大。此外,在碳纤维界面观察到了亚微米尺寸的波纹状的微观形貌特征,如图 9 所示,该特征为胶接工艺提供了大量的咬合点,有助于增大胶接时的咬合作用。因此,飞秒激光清洗材料表面过程除了烧蚀效应,还有对碳纤维表面的微加工作用,这是飞秒激光清洗的一个重要优势。

Delmdahl 等^[43]利用脉宽为 28 ns、波长为 308 nm 的准分子紫外光对胶接前的 CFRP 进行了表面清洗,当激光功率为 30 W 时,每小时的清洗面积为 9.6 m^2 ;当批量生产加工时,可使用 600 W 激光器,预计每小时的清洗面积为 58.3 m^2 。图 10 所示为不同激光脉冲次数下的 CFRP 表面形貌。

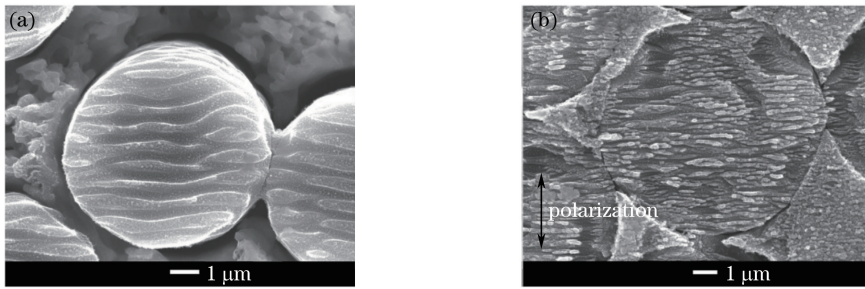


图9 0.35 mJ 激光处理后的材料横截面形貌。(a)激光轨迹中心区的碳纤维;(b)激光轨迹边缘区的碳纤维^[42]
Fig. 9 Cross-sectional morphologies of material after 0.35 mJ laser treatment. (a) Carbon fiber at center of laser trajectory; (b) carbon fiber at border of laser trajectory^[42]

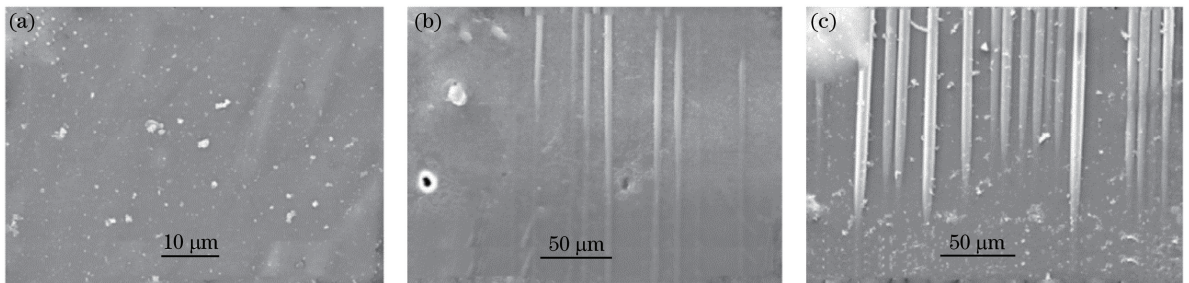


图10 经能量密度为 800 mJ/cm^2 的准分子激光清洗后的 CFRP 表面形貌。(a)无脉冲;(b) 2次脉冲;(c) 6次脉冲^[43]
Fig. 10 CFRP surface morphologies after excimer laser cleaning with energy density of $800 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$.
(a) No pulse; (b) two pulses; (c) six pulses^[43]

Yokozeki 等^[44]使用 CO_2 激光处理了胶接前的 CFRP 表面,对比了激光清洗与砂纸机械打磨后 CFRP 的形貌和胶接后接头的剪切强度,结果表明,砂纸处理后碳纤维发生折断损伤,而激光清洗并未对碳纤维造成损伤,裸露的碳纤维表现完整;两种方法预处理后接头的剪切强度接近,约为 35 MPa,显著大于未经表面处理的 CFRP 胶接接头的搭接强度(19 MPa)。

Fischer 等^[45]对比了紫外光和近红外光两种不同波长的激光对 CFRP 表面的清洗效果,指出两种激光均可以提高胶接后的接头强度,但是近红外激光清洗 CFRP 的工艺窗口较窄,损坏材料的危险系数较高。

Iwahori 等^[46]采用 CO_2 激光去除了 CFRP 材料表面的底漆和面漆,并对比了塑料喷丸、化学脱漆和激光清洗脱漆的效率及脱漆后材料的性能。结果表明,几种脱漆方法处理后,材料的平均拉伸模量、压缩模量、拉伸强度和压缩强度无明显差别,使用横向激励大气压(TEA)- CO_2 激光脱漆系统可以实现 CFRP 表面的有效脱漆,但是需要注意的是激光清洗后基体会出现损伤。Arif 等^[47]利用脉宽为 4 ns、波长为 532 nm 的紫外光辐照去除聚苯乙烯(HIPS)

表面直径为 $12\sim 20 \mu\text{m}$ 的石墨颗粒和直径为 $8\sim 30 \mu\text{m}$ 的聚合物小球,试验证实了激光能量密度较小时清洗工艺的可行性,但激光清洗会对 HIPS 表面造成损伤,高倍显微镜下观察到表面有局部烧蚀坑。

3.6 硅

Vatry 等^[48]利用脉宽为 50 ns、波长为 308 nm 的 XeCl 准分子激光去除硅晶圆、紫外石英和抛光的钨表面直径为 800 nm 的碳微粒和直径为 $5 \mu\text{m}$ 的钨微粒,研究了颗粒去除效率和清洗后基材表面的损伤情况。分析发现,激光去除碳微粒和钨微粒的效率主要取决于颗粒对激光能量的吸收,而基材性能在喷射机制中不起主要作用。此外,激光清洗微粒机制中的烧蚀效应不足以解释灰尘溅射,激光诱导的等离子冲击波才是主要原因。

Kim 等^[14]研究了颗粒尺寸、湿度和老化时间对激光诱导的等离子冲击波清洗硅片表面 SiO_2 颗粒的影响,建立了微粒在激光冲击波作用下的受力,发现激光冲击波式清洗具备控制清洗力的能力。测量了激光诱导的等离子体冲击波的扩张压力,分析了激光冲击波式清洗力随焦点和基材之间距离的变化。随着颗粒尺寸的减小,湿度和老化时间强烈影

响着颗粒的去除效率。对于直径为 $0.3\ \mu\text{m}$ 的颗粒,去除率主要受湿度影响。对于直径为 $1\ \mu\text{m}$ 的颗粒,去除率大于 80% ,与湿度和老化时间无关。这表明控制湿度是清洗工艺中获取较大颗粒去除率的一个关键参数。此外, Kim 等^[49]还对激光冲击波清洗前后硅表面紫外光刻防护层的表面形貌特征进行了研究,并利用原子力显微镜(AFM)测量了颗粒在激光辐照前后的粘附力。结果发现,粘附力随激光能量的增大和距离的减小而减小,随激光脉冲数量的增加而减小。Kim 等^[50]建立了二维理论模型以阐明激光清洗工艺中的水动力学。激光冲击波清洗的数值模拟结果与试验观察结果一致,解释了流体动力学现象,弥补了过去单一冲击波理论的不足。倾斜入射的激光比平行入射光具有更大的清洗效率,但同时也会增大热损伤发生的几率。Kim 等^[51]为了描述激光清洗硅片的工艺,实时测量了冲击产生的声波,并分析了激光功率密度和气相组分等工艺参数对激光清洗的影响。结果表明,声波强度与冲击波强度密切相关,声波强度随激光功率密度的增大而增大;此外,与空气和氮气相比,氩气环境能更有效地增大声波强度,进而实现更高的清洗性能。

3.7 其他合金

Moskal 等^[52]利用脉宽为 $10\ \text{ps}$ 、波长为 $532\ \text{nm}$ 的皮秒激光,清洗了镍基高温合金 AM1 表面的氧化膜,分析了激光工艺参数对 AM1 合金表面的影响,优化了扫描工艺的参数。结果表明,当激光能量密度 $0.82\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,优化的激光光斑搭接率约为 86.7% ,此时计算得到的热积累温度可达 $380\ \text{K}$ 。

Kumar 等^[53]激光清洗了应用于热发射领域的钨丝表面的氧化膜,采用的是调 Q 的 Nd:YAG 激光,脉宽为 $6\sim 8\ \text{ns}$,波长为 $1064\ \text{nm}$ 和 $532\ \text{nm}$ 。图 11 所示为钨丝氧化区和激光清洗区的 AFM 图。

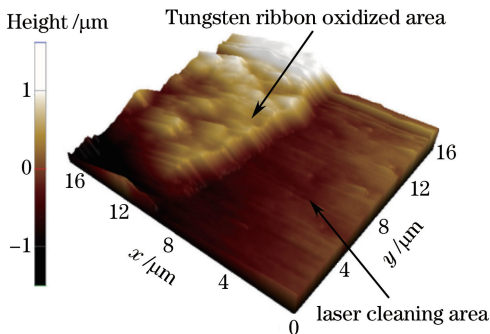


图 11 钨丝氧化区和激光清洗区的 AFM 图^[53]

Fig. 11 AFM image of tungsten wire across oxidized and laser cleaning areas^[53]

结果发现,清洗机理依赖于激光的波长和能量密度,清洗后的钨丝作为样品丝成功应用于热电质谱仪,可确定钨原子的同位素组成,并提出未来这种激光处理工艺可以代替传统的化学清洗方法,减少环境的污染。

Zhao 等^[54]利用脉宽为 $4\ \text{ns}$ 、波长为 $1064\ \text{nm}$ 的纳秒脉冲激光清洗了黄铜圈表面的氧化物,给出了氧化层去除效率和离焦量之间的关系,负离焦和正离焦等离子体的不同机制导致了不同的激光清洗结果,试验结果表明,适用于黄铜圈表面污物去除的离焦量的绝对值应该小于 $1\ \text{mm}$ 。

综上所述,激光清洗时需要根据不同的清洗对象选择合适的激光波长、脉冲宽度、脉冲频率等参数。国内外针对涂层和微小颗粒的激光清洗研究绝大多数都选择了波长为 $1064\ \text{nm}$ 的纳秒脉冲光纤激光器,但是二者的激光脉冲频率有很大差别,前者的脉冲频率为几千赫兹到几十千赫兹,清洗后表面粗糙度可达 $1\ \mu\text{m}$ 左右,后者则集中在几赫兹到几十赫兹,去除率可达 90% 以上。针对漆层的激光清洗,激光器的选择逐渐从过去波长为 $10.64\ \mu\text{m}$ 的高功率 CO_2 激光器向波长为 $1064\ \text{nm}$ 的脉冲光纤激光器转变,此时需要综合考虑不同颜色漆层对激光的吸收能力及清洗效率以选择合适波长的激光器,清洗后表面粗糙度接近 $1\ \mu\text{m}$ 。针对树脂、油污及其他有机物的清洗,脉冲光纤激光器、连续 CO_2 激光器和准分子激光器等均被使用,与未清洗的相比,清洗后复合材料胶接接头的剪切强度均有一定程度的提高,油污去除率可达 95% 。

4 激光清洗技术的应用

20 世纪 80 年代,半导体行业的高速发展对硅晶圆掩模表面的污染微粒的清洗技术提出了更高的要求,其关键点在于克服污染微粒与基材之间极大的吸附力,传统的化学清洗、机械清洗、超声清洗方法均无法满足需求,而激光清洗可以解决此类污染问题,相关研究与应用得到迅速发展。1987 年,首次出现了关于激光清洗的专利申请^[55]。进入 20 世纪 90 年代后,Zapka 等^[56-57]成功将激光清洗技术应用于半导体制造工艺,去除了掩模表面的微粒,实现了早期激光清洗技术在工业领域的应用。1995 年,研究者使用 $2\ \text{kW}$ 的 TEA- CO_2 激光器成功实现了飞机机身除漆的清洗。进入 21 世纪后,随着超短脉冲激光器的高速发展,国内外对激光清洗技术的研究和应用逐步增多,重点集中在金属材料

表面,国外的典型应用有飞机机身脱漆、模具表面除油污、发动机内部除积碳和焊前接头的表面清理等。美国爱迪生焊接研究所激光清洗了 F-16 战机,当激光功率为 1 kW 时,每分钟的清洗体积为 2.36 cm^3 。值得一提的是,先进复合材料部件的激光脱漆研究与应用也是一大热点。美国海军 H-53、H-56 直升机的螺旋桨叶片和 F16 战斗机的平尾等复合材料表面均已实现激光脱漆应用^[58],我国复合材料在飞机上的应用较晚,因此此类研究基本处于空白。此外,利用激光清洗技术对 CFRP 复合材料胶接前接头进行表面处理以提高接头强度也是当前的研究重点之一^[42-45]。Adapt Laser 公司给奥迪 TT 汽车生产线提供了光纤激光清洗装备,以清洗轻质铝合金车门框表面的氧化膜。英国 Rolls-Royce 公司用激光清洗了钛合金航空发动机部件表面的氧化膜。

国内学者在激光清洗领域开展研究的时间较晚,加上短脉冲激光器本身价格昂贵,需要更高的清洗效率才能在实际应用中取得较高价值,因此目前的相关应用极少。

近年来,国内的一些高校、科研院所和企业陆续开展了激光清洗技术在工业领域的应用研究,并且进行了激光清洗装备的制造。哈尔滨工业大学开展了汽车热成型钢表面 Al-Si 涂层的去除、钢铁表面除锈、航天铝合金及钛合金焊前除氧化膜、铝基复合材料表面除污物、陶瓷材料的清洗等研究。中国工程物理研究院开展了对轮胎模具除脱模剂,飞机机翼和雷达罩(复合材料)及坦克装甲脱漆,船用部件除锈等的研究。上海临仕激光科技有限公司开展了涡轮叶片、航天进气道(钛合金)及轻质合金焊前的表面清洗工艺研究,并已开发出激光清洗装备。中国科学院沈阳自动化研究所开展了核电管道内部污物的清洗工艺探索。大族激光科技股份有限公司开展了去除行星轮架(铸铝)和从动锥齿轮表面的氧化物、铜件表面的氧化物、活塞表面的石墨以及锯片表面的油漆的工艺探索。苏州大学开展了汽车蜗壳除锈、轨道养护除污物和绝缘瓷瓶除垢等方面的研究。

5 结束语

综述了目前国内外激光清洗的研究现状,在理论与工艺方面,虽然国内外在激光清洗的工艺研究方面均已开展了大量试验,但是激光清洗的理论和机理研究尚不完善。尽管已建立了相关物理模型,但是这些模型仍然有很大局限性。在实际应用方面,国内与国外的差距较大,这是因为国内激光清洗

工艺不够成熟,设备限制了激光清洗效率和精度,尤其是我国无法自主研发高功率短脉冲激光器,这是限制高效激光清洗成套装备开发的一大瓶颈。激光清洗技术作为激光制造中的一种先进技术,在工业发展中的应用潜力巨大,大力发展激光清洗技术具有非常重要的战略意义。

参 考 文 献

- [1] Bedair S M, Smith H P. Atomically clean surfaces by pulsed laser bombardment[J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40(12): 4776-4781.
- [2] Lu Y F, Song W D, Low T S. Laser cleaning of micro-particles from a solid surface-theory and applications[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 1998, 54(1): 181-185.
- [3] Tam A C, Leung W P, Zapka W, *et al.* Laser-cleaning techniques for removal of surface particulates [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71(7): 3515-3523.
- [4] Oltra R, Yavaş O, Cruz F, *et al.* Modelling and diagnostic of pulsed laser cleaning of oxidized metallic surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 1996, 96/97/98: 484-490.
- [5] Zapka W, Ziemlich W, Tam A C. Efficient pulsed laser removal of $0.2 \mu\text{m}$ sized particles from a solid surface[J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 58(20): 2217-2219.
- [6] Zhou X, Imasaki K, Furukawa H, *et al.* A study of the surface products on zinc-coated steel during laser ablation cleaning [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 137(2): 170-174.
- [7] Zhang X, Chen Y H. Research progress and prospect of application of different types laser in laser cleaning technology[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(8): 37-40.
张鑫, 陈玉华. 各类型激光器在激光清洗技术应用中发展现状及展望[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(8): 37-40.
- [8] Schawlow A L. Lasers[J]. *Science*, 1965, 149(3679): 13-22.
- [9] Zapka W, Ziemlich W. Efficient pulsed laser removal of $0.2 \mu\text{m}$ sized particles from a solid surface[J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 58(20): 2217-2219.
- [10] Lu Y F, Loh T E, Teo B S, *et al.* Effect of polarization on laser-induced surface-temperature rise [J]. *Applied Physics A*, 1994, 58(4): 423-429.
- [11] Marimuthu S, Kamara A M, Whitehead D, *et al.*

- Laser removal of TiN coatings from WC micro-tools and in-process monitoring[J]. *Optics and Laser Technology*, 2010, 42(8): 1233-1239.
- [12] Yue L Y, Wang Z B, Li L. Material morphological characteristics in laser ablation of alpha case from titanium alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(20): 8065-8071.
- [13] She M, Kim D, Grigoropoulos C P. Liquid-assisted pulsed laser cleaning using near-infrared and ultraviolet radiation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 86(11): 6519-6524.
- [14] Kim T G, Yoo Y S, Lee S H, *et al.* Effects of size, humidity, and aging on particle removal from Si wafers [J]. *Microelectronic Engineering*, 2009, 86(2): 145-149.
- [15] Li F, Chen X G, Lin W H, *et al.* Nanosecond laser ablation of Al-Si coating on boron steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 319: 129-135.
- [16] Windmann M, Röttger A, Kügler H, *et al.* Removal of oxides and brittle coating constituents at the surface of coated hot-forming 22MnB5 steel for a laser welding process with aluminum alloys[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 285: 153-160.
- [17] Chen X. Al-Si coating heat molding steel plate laser welding characteristics and nanosecond laser peeling methods research [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 48-59.
陈曦. Al-Si 涂层热成型钢板激光焊接特性及纳秒激光剥层方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 48-59.
- [18] Gao W W, Guo L, Xu P Y. Effects of process parameters on 304 stainless steel surface cleaning treated by 532 nm laser[J]. *Applied Laser*, 2016, 36(2): 199-204.
高雯雯, 郭亮, 许佩吟. 532 nm 激光工艺参数对 304 不锈钢表面清洗的影响[J]. *应用激光*, 2016, 36(2): 199-204.
- [19] Tang Q H, Zhou D, Wang Y L, *et al.* Laser cleaning of sulfide scale on compressor impeller blade [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 355: 334-340.
- [20] Ahn D, Jang D, Park T, *et al.* Laser removal of lubricating oils from metal surfaces [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206(18): 3751-3757.
- [21] D'Addona D M, Genna S, Giordano A, *et al.* Laser ablation of primer during the welding process of iron plate for shipbuilding industry[J]. *Procedia Cirp*, 2015, 33: 464-469.
- [22] Tong Y Q. Study on mechanism and application fundamentals of laser removal of metal oxides[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014: 25-83.
佟艳群. 激光去除金属氧化物的机理与应用基础研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2014: 25-83.
- [23] Yu H B, Wang C M, Wang J, *et al.* Research on the laser derusting of carbon steel surface [J]. *Applied Laser*, 2014(4): 310-314.
俞鸿斌, 王春明, 王军, 等. 碳钢表面激光除锈研究 [J]. *应用激光*, 2014(4): 310-314.
- [24] Li W. Research on mechanisms of laser rust removal and manufacture of laser cleaning devices[D]. Tianjin: Nankai University, 2014: 39-113.
李伟. 激光清洗锈钢的机制研究和设备开发 [D]. 天津: 南开大学, 2014: 39-113.
- [25] Shen Q, Tong Y Q, Ma G D, *et al.* Study on surface roughness of the substrate after laser derusting [J]. *Laser & Infrared*, 2014(6): 605-608.
沈全, 佟艳群, 马桂殿, 等. 激光除锈后基体表面粗糙度的研究 [J]. *激光与红外*, 2014(6): 605-608.
- [26] Zhang S G, Zhang L, Yu T Y, *et al.* Study about plasma intensity of laser derusting [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(1): 56-58.
张曙光, 张磊, 余天宇, 等. 激光除锈过程中的等离子体强度研究 [J]. *激光技术*, 2013, 37(1): 56-58.
- [27] Xie Y F, Liu H W, Hu Y X. Determining process parameters for laser derusting of ship steel plates[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0403008.
解宇飞, 刘洪伟, 胡永祥. 船舶板材激光除锈工艺参数确定方法研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403008.
- [28] Liu H W, Zhou Y M. Technology and application of optical fiber laser derusting of ship steel plates [J]. *Marine Technology*, 2016(6): 87-93.
刘洪伟, 周毅鸣. 船用板材激光除锈应用技术 [J]. *造船技术*, 2016(6): 87-93.
- [29] Jasim H A, Demir A G, Previtali B, *et al.* Process development and monitoring in stripping of a highly transparent polymeric paint with ns-pulsed fiber laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 93: 60-66.
- [30] Zhu W, Meng X W, Dai Z C, *et al.* Research on the laser depainting process of carbon steel surface [J]. *Electric Welding Machine*, 2015, 45(11): 126-128.
朱伟, 孟宪伟, 戴忠晨, 等. 铝合金平板表面激光除漆工艺 [J]. *电焊机*, 2015, 45(11): 126-128.
- [31] Wang Q, Guan Y C, Cong B Q, *et al.* Laser cleaning of commercial Al alloy surface for tungsten inert gas welding [J]. *Journal of Laser Applications*,

- 2016, 28(2): 022507.
- [32] Alshaer A W, Li L, Mistry A. The effects of short pulse laser surface cleaning on porosity formation and reduction in laser welding of aluminum alloy for automotive component manufacture[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 64(4): 162-171.
- [33] Wu Y R, Lin J P, Carlson B E, *et al.* Effect of laser ablation surface treatment on performance of adhesive-bonded aluminum alloys[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 304: 340-347.
- [34] Mandolino C, Lertora E, Genna S, *et al.* Effect of laser and plasma surface cleaning on mechanical properties of adhesive bonded joints[J]. *Procedia Cirp*, 2015, 33: 458-463.
- [35] Ragusich A, Taillon G, Meunier M, *et al.* Selective pulsed laser stripping of TiAlN erosion-resistant coatings: effect of wavelength and pulse duration[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 232(10): 758-766.
- [36] Yue L Y, Wang Z B, Li L. Material morphological characteristics in laser ablation of alpha case from titanium alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(20): 8065-8071.
- [37] Kumar A, Sapp M, Vincelli J, *et al.* A study on laser cleaning and pulsed gas tungsten arc welding of Ti-3Al-2.5V alloy tubes[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(1): 64-71.
- [38] Uccello A, Maffini A, Dellasega D, *et al.* Laser cleaning of pulsed laser deposited rhodium films for fusion diagnostic mirrors[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2013, 88(6/7/8): 1347-1351.
- [39] Kumar A, Prasad M, Bhatt R B, *et al.* Laser shock cleaning of radioactive particulates from glass surface [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 57(6): 114-120.
- [40] Ye Y Y, Yuan X D, Xiang X, *et al.* Laser plasma shockwave cleaning of SiO₂ particles on gold film[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(4): 536-541.
- [41] Ye Y Y, Yuan X D, Xiang X, *et al.* Laser cleaning of particle and grease contaminations on the surface of optics[J]. *Optik*, 2012, 123(12): 1056-1060.
- [42] Oliveira V, Sharma S P, Moura M F S F D, *et al.* Surface treatment of CFRP composites using femtosecond laser radiation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 94: 37-43.
- [43] Delmdahl R, Brune J, Pätzelt R. Ultraviolet laser cleaning of carbon fiber composites[J]. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2016, 55(1): 1-4.
- [44] Yokozeki T, Ishibashi M, Kobayashi Y, *et al.* Evaluation of adhesively bonded joint strength of CFRP with laser treatment[J]. *Advanced Composite Materials*, 2015, 25(4): 1-11.
- [45] Fischer F, Kreling S, Dilger K. Surface pretreatment of CFRP by using laser radiation[C]. *The 19th International Conference on Composite Materials*, 2013: 1-10.
- [46] Iwahori Y, Hasegawa T, Nakane K. Experimental evaluation for CFRP strength after various paint stripping methods[J]. *Aeronautical and Space Sciences Japan*, 2007, 55: 235-240.
- [47] Arif S, Kautek W. Pulse laser machining and particulate separation from high impact polystyrene [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 288(1): 9-14.
- [48] Vatry A, Habib M N, Delaporte P, *et al.* Experimental investigation on laser removal of carbon and tungsten particles[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(10): 5569-5573.
- [49] Kim T G, Yoo Y S, Ahn J, *et al.* Adhesion force change on multilayer EUVL mask due to laser induced plasma shock wave[J]. *Microelectronic Engineering*, 2009, 86(2): 150-154.
- [50] Kim D, Oh B, Jang D, *et al.* Experimental and theoretical analysis of the laser shock cleaning process for nanoscale particle removal [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(19): 8322-8327.
- [51] Kim T, Lee J M, Cho S H, *et al.* Acoustic emission monitoring during laser shock cleaning of silicon wafers[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(9): 1010-1020.
- [52] Moskal D, Martan J, Kučera M, *et al.* Picosecond laser surface cleaning of AM1 superalloy[J]. *Physics Procedia*, 2016, 83: 249-257.
- [53] Kumar A, Sonar V R, Das D K, *et al.* Laser cleaning of tungsten ribbon[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 308(308): 216-220.
- [54] Zhao M L, Liu T G, Jiang J F, *et al.* Effect of defocusing distance on the contaminated surface of brass ring with nanosecond laser in a 3D laser scanning system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 59(9): 11-18.
- [55] Shi S D, Li W, Yi S M, *et al.* To see the development of laser cleaning technology from laser cleaning patents[J]. *Cleaning World*, 2009, 25(9): 26-33.
- 施曙东, 李伟, 易三铭, 等. 从激光清洗专利看激光

- 清洗技术的发展[J]. 清洗世界, 2009, 25(9): 26-33.
- [56] Zapka W, Tam A C, Ziemlich W. Laser cleaning of wafer surfaces and lithography masks [J]. Microelectronic Engineering, 1991, 13(1/2/3/4): 547-550.
- [57] Zapka W, Tam A C, Ayers G, *et al.* Liquid film enhanced laser cleaning[J]. Microelectronic Engineering, 1992, 17(1/2/3/4): 473-478.
- [58] Xuan S Y. Study on laser paint stripping technology for aircraft composite parts[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2016(8): 15-18.
- 宣善勇. 飞机复合材料部件表面激光除漆技术研究进展[J]. 航空维修与工程, 2016(8): 15-18.