

## 激光与光电子学进展

## 涂装前处理激光除锈技术研究进展

喻忠翰<sup>1</sup>, 尹莉<sup>1\*</sup>, 徐艳龙<sup>2</sup>, 赵远涛<sup>2</sup>, 姜涛<sup>2</sup>, 凌建民<sup>3</sup>, 李文戈<sup>2</sup><sup>1</sup>上海海事大学物流工程学院, 上海 201306;<sup>2</sup>上海海事大学商船学院, 上海 201306;<sup>3</sup>上海良时智能科技股份有限公司, 上海 201413

**摘要** 海洋腐蚀造成的安全隐患和经济损失是船舶领域一直关注的重点和难点,随着相关法律法规的出台,以及航运业对船舶及其锈蚀部件清洗的改进需求,使得传统除锈方法出现的低效率、低精度、不同程度的基底损坏、化学污染、资源浪费和职业危害等问题更加突出。激光除锈技术是一种非接触式的绿色除锈方法,具有高效率、低成本、可实现自动化等优点,近年来已成为船舶领域的热门研究方向。介绍了激光除锈技术的国内外研究现状,对典型的激光除锈方法和机理进行了说明,阐述了工艺参数对船用钢激光除锈时的影响、激光除锈与其他相关技术的结合应用等,展望了激光除锈技术在船舶领域实施较大规模应用的发展前景,为未来激光除锈技术在船舶领域的应用提供了一定的参考。

**关键词** 激光除锈; 工艺参数; 除锈机理; 船舶领域

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223299

## Research Progress of Laser Derusting Technology in Coating Pretreatment

Yu Zhonghan<sup>1</sup>, Yin Li<sup>1\*</sup>, Xu Yanlong<sup>2</sup>, Zhao Yuantao<sup>2</sup>, Jiang Tao<sup>2</sup>, Ling Jianmin<sup>3</sup>, Li Wenge<sup>2</sup><sup>1</sup>School of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;<sup>2</sup>Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;<sup>3</sup>Shanghai Liangshi Intelligent Technology Co., Ltd., Shanghai 201413, China

**Abstract** The safety hazard and economic losses caused by marine corrosion have posed major challenges in shipping. With the introduction of relevant laws and regulations that require the shipping industry to improve the cleaning needs of ships and monitor their corroded parts, the issues of low efficiency, low precision, varying degrees of substrate damage, chemical pollution, resource waste, and occupational hazards of traditional rust removal have become prominent. Laser derusting technology is a noncontact green derusting method with the advantages of high efficiency, low costs, and automation. This paper introduces the research status of laser rust removal techniques and describes the typical laser rust removal methods and mechanisms, the combined application of laser derusting, and other related technologies. The development prospects of laser derusting technology in shipping is presented. The findings afford a reference for the future application of laser derusting technology in ships.

**Key words** laser rust removal; process parameter; derusting mechanism; shipping field

## 1 引言

海洋环境具有高盐度、高湿度的特点,在这种特殊环境下所导致的船舶和海洋工程结构的锈蚀问题一直是影响船舶和工件使用寿命的重要因素。因此,船舶及海洋工程结构必须具备一定的防腐功能,才能满足实际需求<sup>[1]</sup>。对船体进行除锈处理是防止表面发生腐蚀的一道重要工序,不论是涂漆、刷涂防护层等表面处

理技术还是船舶建造的整个流程,除锈作业作为预处理工序一直贯穿始终,直接影响了船舶涂层的寿命和效果及防腐性能<sup>[2]</sup>。海洋工程及船舶行业目前使用的除锈技术主要有手工除锈、高压水枪清洁及喷砂除锈技术等,其优缺点如表 1 所示。

传统的手工除锈依赖人力、效率低下、需要消耗大量资源,且除锈效果差,难以达到清洁度的要求;高压水枪清洁工艺虽然达到了环保清洁的目的,但由于存

收稿日期: 2023-01-04; 修回日期: 2023-01-30; 录用日期: 2023-02-22; 网络首发日期: 2023-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(52072236, 52002242)

通信作者: \*liy@shmtu.edu.cn

表 1 除锈技术的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of derusting technology

Rust removal technology	Classification	Advantage and disadvantage
Traditional derusting	Manual and mechanical grinding	Low efficiency, difficult to reach the cleaning standard
	Chemical dissolution	Large amount of solvent required, low cleaning efficiency, easy to cause environmental problems
	Ultrasonic cleaning	Rust removal efficiency is fast, but the cost is high, secondary treatment is required, and the noise is loud
	High pressure water gun	Environmentally friendly and clean, but it will cause waste of water resources and noise pollution
Advanced technique	Sandblasting	Derusting effect is excellent, but it will affect the health of workers
	Laser derusting	Greatly reduce the cost of rust removal process, and it is green and environmentally friendly with high cleaning efficiency

在反锈问题、噪声污染、水资源浪费等缺点,该工艺未能广泛普及;喷砂工艺则凭借着高质量的表现,在船舶修理和造船产业等领域被广泛使用,但也有一定的局限性,比如严重的灰尘污染、工作环境恶劣影响工人身体健康、容易造成基材损坏等<sup>[3-5]</sup>。因此,在绿色船舶概念不断发展的趋势下,探索经济环保的船舶基板除锈技术是必要的。

激光除锈技术由于其环保、高效、非破坏、精密等卓越的性能,近年来已经成为船舶领域的热门研究方向。由于起点不同,国内船舶领域的激光除锈技术研究和应用的整体水平与外国有不小差距<sup>[6]</sup>。国外由于海洋运输业的发展带动,其在船舶表面除锈方面,除了有经筛选留存下来的传统技术,还具备完善的船舶激光除锈产业系统;此外,智能爬壁激光除锈机器人的研制与推广,进一步促进船舶激光除锈智能化和效率化<sup>[7]</sup>,因此在船舶激光除锈方面一直处于领先地位;而国内船舶行业激光除锈技术目前还处于研发和试验验证阶段,现阶段我国对企业产业技术改造及企业间产学研合的大力支持,以

及不可忽视的更严格的环保法律,使得船厂和激光研发企业的合作紧密起来,间接加快了激光除锈技术在船舶领域实现工业化应用的发展<sup>[8]</sup>。

本文首先介绍国内外激光除锈技术的发展和突破,然后对两种经典的除锈原理进行阐述,最后列举了除锈技术与视觉相结合的智能除锈系统以及实时监测系统的成果,为未来开展船舶除锈领域的除锈研究与应用提供一定的参考。

## 2 国内外研究现状

激光除锈技术是激光清洗衍生出的一项实用型技术,除锈理论的研究也是在激光清洗理论研究的基础上进行深入探讨,包括清除锈层和清除微粒的作用机理的差别、锈层和微粒与基体之间相互作用力的差别、锈层和微粒吸收激光能量的差别、锈层和微粒脱离基体方式的差别等。激光除锈理论的研究方法历程,如表 2 所示。

表 2 激光除锈理论研究历程

Table 2 Research history of laser derusting theory

Research Method (Mechanism)	Model	Effect
Combined adhesive force and surface wave generated clearance force	Mathematical models of three kinds of adhesion forces between particles and matrix	Interaction between submicron particles and matrix was investigated for the first time, which provided the basis for the subsequent research
From a one-dimensional model to a three-dimensional model	Unsteady three-dimensional model of particles	Forces between particles are considered, providing an accurate model for smaller particle diameters
Errors are considered on the basis of the existing model	Double layer thermoelastic vibration model	Cleaning and damage thresholds of the matrix were calculated
Comparative study of experimental data and theoretical results	Nano laser dry cleaning model	Nano-dry laser cleaning cannot be explained purely on the basis of an expansion model
Comparative study of experimental data and theoretical results	One-dimensional model considering temperature-dependent absorption coefficient and multi-pulse damage based on plastic deformation accumulation	Experimental damage threshold is consistent with the theory

## 2.1 国外研究现状

激光清洗理论可以追溯到 1970 年,当时科学家 Asmums<sup>[9]</sup>提出了激光清洗的概念,该技术最初应用于去除表面颗粒和保护文物方面。1990 年,激光清洗技术开始应用于去除材料表面的薄铁锈。英国科学家 Korenberg 等<sup>[10]</sup>对传统机械除锈和激光除锈进行对比,发现机械除锈和激光除锈同时进行的除锈效果比二者单独除锈的效果好。进入 21 世纪以来,激光清洗技术的发展趋势已经从对微小颗粒的清洗转换到了对其清洗机理研究。Hsu 等<sup>[11]</sup>研究了存在于微小颗粒和基体之间 3 种黏附力,利用表面微波理论,建立了去除基体

表面微粒的数学模型,如图 1 所示。Lu 等<sup>[12]</sup>表明了激光清洗通常在均匀表面加热的一维模型内进行分析,实际上由于散射和衍射,表面粒子的周围会产生不均匀的强度分布,因此产生了温度的非稳态三维分布和表面的非稳态三维变形,并基于此建立了三维模型。结果表明,当粒子直径为  $1\ \mu\text{m}$  左右时,该模型比传统模型更加精确,为粒子去除的进一步研究提供理论指导。Chen 等<sup>[13]</sup>利用高功率的光纤激光器对船用钢板进行除锈,除锈效果达到预期;Ambar 等<sup>[14]</sup>利用短脉冲激光清洗铝合金和铬镍铁合金时发现,当 Nd:YAG 激光器的峰值功率达到 22 kW,清洗效率高达 98%。

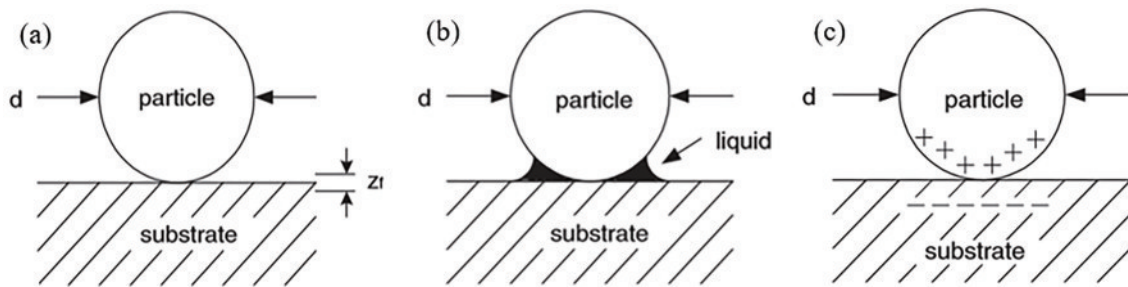


图 1 表面微粒与基体之间的 3 种黏附力。(a)范德华力;(b)毛细管冷凝力;(c)静电双层力<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Three adhesion forces between surface particles and substrate. (a) Van der Waals force; (b) capillary condensing force; (c) electrostatic double layer force<sup>[11]</sup>

国外对激光清洗技术已有近 40 年的使用经验,设备种类多、波长范围广,在理论储备上也非常丰富。激光除锈技术初期因为激光功率和能量的要求很大,一直发展缓慢;近几年来,由于高能量的短脉冲激光的发明,使得激光除锈技术蓬勃发展;在电路板生产工业方面,激光清洗已经实现工业化,并且正在逐渐代替传统方法;目前在激光除锈方面的规模化应用也较为先进,在船舶、航天、桥梁等精细工业方面的应用取得了成果<sup>[15]</sup>,激光除锈技术与行业融合度较高。

## 2.2 国内研究现状

2002 年,徐传义等<sup>[16]</sup>进行了激光清洗超光滑光学基板表面的作用机理的激光清洗实验,利用扫描电子显微镜(SEM)分析了超光滑光学基板上粘附污染微粒的性质和分布,对比传统清洗和激光清洗清洗后的结果,发现传统的清洗方法无法清除微米级及以上的粒子粘附,而激光清洗后的效果非常明显。2008 年,田彬等<sup>[17]</sup>考虑清洗过程中污垢与基体之间的热弹性振动及其相互作用,建立双层热弹性振动模型,计算出基体的理论清洗阈值和损伤阈值。2014 年,佟艳群等<sup>[18]</sup>研究了激光与金属氧化物作用的物理机理,得出激光烧蚀效应是物理化学效应和弹性振动效应共同作用的结论,并指出激光除锈工艺存在巨大的技术研究空间。南开大学李伟等<sup>[19]</sup>提出同步清洗锈层钝化条件和湿型双光束除锈钝化方法,针对激光与锈蚀相互作用的过程进行 ANSYS 仿真,建立了低于材料气化阈值下的锈层清洗的分层模型。2017 年,中国科学院金属研

究所任志国等<sup>[20]</sup>通过对基体表面的微观组织、力学性能、硬度等进行比较研究。结果表明,采用合适的激光除锈工艺参数清洗后,对基体表面性能没有明显影响,也没有损伤基体。近几年,国内超短脉冲研制可达  $3.5\ \mu\text{m}$ ,并且实现稳定锁模,相比一般脉冲激光,可以达到更理想的加工效果;此外,激光写入人工神经网络、激光与相对论电子等各产业方面的综合研究与发展,更加表明国内激光技术有着广阔的前景<sup>[21-23]</sup>。

我国在激光清洗除锈及其相关设备方面的研究起步较晚、发展缓慢,尽管近年来取得了一些成果,但与国外相比还有很大差距,比如总体工艺水平落后、产业化缓慢、产品依赖进口以及无法自主定价。目前,在中国工程物理研究院、中国科学技术大学等研究机构都设有专门的激光清洗实验室。近年来,国内关于激光清洗除锈的科学论文越来越多,清洗材料的多样性和应用范围也在不断扩大<sup>[24-25]</sup>。

## 3 锈层结构及除锈技术原理

### 3.1 表面锈层的结构特性

复杂的海洋环境导致了钢表面不同的腐蚀形态。研究表明,钢在海水中的腐蚀属于电化学腐蚀反应。相关研究人员使用 X 射线衍射(XRD)和 SEM 技术对钢铁表面的海洋腐蚀进行表征<sup>[26-27]</sup>,并着重对腐蚀层进行观察和研究。图 2 为钢表面锈蚀层结构图,钢表面的锈蚀层显现为双层锈的结构,主要分为上下两层和层间的夹杂相。最外面的锈层呈现红棕色的外观且疏松

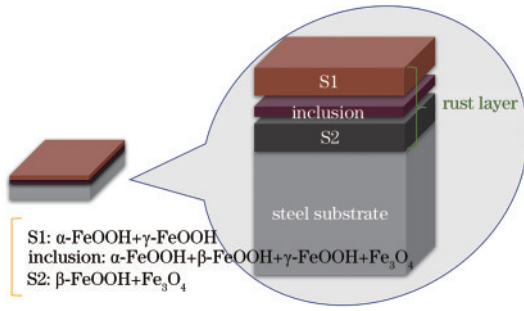


图 2 钢铁表面锈蚀层结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of corroded layer on steel surface

多孔,容易剥落。双锈层中间存在一定程度的夹杂相,四相共存,且各相的特征形态是一体化的,因此表面非常不平整,呈现出高度的非均质状态。锈蚀层最内层靠近钢基体,高度富集的 $Fe_3O_4$ 相则呈深褐色斑块。

### 3.2 除锈技术和原理

激光除锈过程复杂、机理多样,一般包括激光热膨胀撕裂效应、高温汽化、激光声振荡、等离子体冲击效应等<sup>[28]</sup>。典型的激光清洗方法包括干式激光清洗、蒸汽式激光清洗以及激光冲击波清洗,如表 3 所示。

表 3 典型激光清洗技术

Table 3 Typical laser cleaning techniques

Laser cleaning technology	Instruction	Schematic diagram
Dry laser cleaning	Advantages: no need to pretreat the matrix, more convenient Disadvantages: the impact is small, and the removal effect of the stain is not ideal	
Steam laser cleaning	Advantages: the impact force is much stronger than dry cleaning Disadvantages: liquid film composition ratio is not accurate resulting in poor cleaning effect	
Laser shock wave cleaning	Advantages: high cleaning accuracy Disadvantages: cleaning conditions are difficult to control, affecting the cleaning effect	

由于蒸汽清洗过程中基底表面存在薄液膜,除锈后,钢板表面残留气泡形成水滴,钢板会产生反锈现象。同时,基材表面的化学成分容易发生变化,产生新的物质,不能满足清洗的表面质量要求,因此,在船舶领域中干式激光清洗是应用最广泛的一种<sup>[4]</sup>,通过选

干式激光清洗过程为强短脉冲激光照射到附着颗粒的机体表面时,由于基体和颗粒的反射率不同,吸收激光能量的方式分为底物吸收、微粒吸收和混合吸收。一般干式激光清洗的吸收方式为底物吸收。基体吸收来自激光的能量,引起温度急剧升高,形成法向膨胀,这种法向膨胀所形成的瞬时加速度可以达到重力加速度的一千万倍<sup>[29-33]</sup>,从而形成基质加速器,将微小颗粒去除;而蒸汽式激光清洗的过程和干式激光清洗相似,只是在清洗前预先使用辅助液体进行沉积,在基体表面形成一层薄薄的辅助液体膜,其吸收激光能量的方式分为强基底吸收、液膜吸收以及基底和液膜部分吸收,热扩散长度在有液膜的情况下为 0.1 μm,而无液膜的情况下为 1 μm,热扩散长度大大缩短,从而形成强大的瞬态力,去除微小颗粒;激光冲击波清洗法是使用等离子体冲击波进行清洗的方法,激光束的焦点处与微粒附近保持在很小的范围,焦点所在的空气被电离所产生球形的冲击波作用于基材表面,如果冲击波与基材表面平行的力大于垂直方向上的微粒的黏附力,微粒就会沿着冲击波作用力的方向脱离基体表面<sup>[21-23]</sup>。

择设备和优化工艺参数来完成对铁锈、涂层、漆层、油膜等污垢的清洗。

## 4 工艺参数对除锈结果的影响

要想得到较好的激光除锈结果,首先需要明确一

般激光除锈机器的参数,比如功率、频率、脉宽、扫描速度、清洗次数、搭接率等对清洗结果的影响,了解工艺参数和除锈结果的匹配关系,才能使激光除锈技术在船舶领域的普及和最佳除锈方案的制定成为可能。激光参数间的关系如下:

$$F = \frac{E}{S}, \quad (1)$$

$$P_{\text{peak}} = \frac{E}{\tau}, \quad (2)$$

$$\bar{P} = E \cdot f, \quad (3)$$

式中: $F$ 为激光能量密度; $E$ 为激光能量; $S$ 为光斑面积; $P_{\text{peak}}$ 为激光峰值功率; $\tau$ 为激光脉宽; $\bar{P}$ 为激光平均功率; $f$ 为激光脉冲频率。

#### 4.1 功率与光斑

激光功率是去除锈蚀的最主要参数,其影响激光

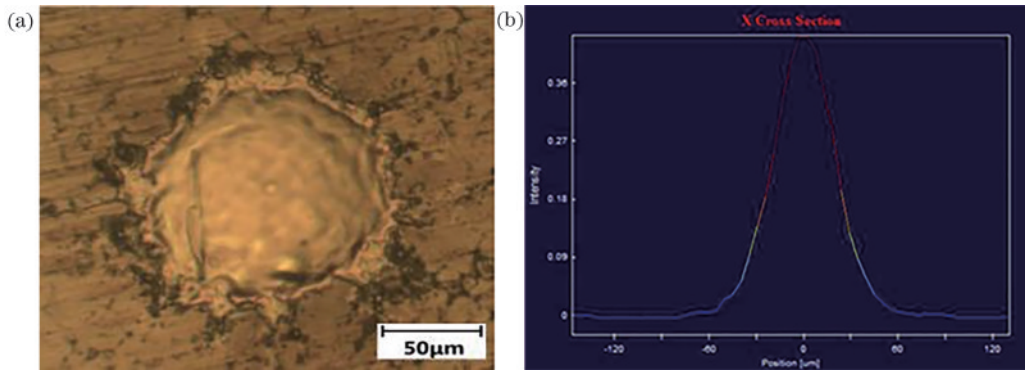


图3 亮斑特性。(a)亮斑形貌<sup>[32]</sup>;(b)脉冲激光光斑能量分布<sup>[4]</sup>

Fig. 3 Bright spot characteristics. (a) Bright spot morphology<sup>[32]</sup>; (b) pulse laser spot energy distribution<sup>[4]</sup>

#### 4.2 扫描速度和清洗次数

扫描速度和清洗次数都是影响清洗效率的重要工艺参数。扫描速度快,污染物吸收激光辐照的积热不足,难以产生烧蚀效应和气化效应,清洗效果差<sup>[35]</sup>;扫描速度过小,可以很好地去除污染物,但效率低下,对薄层腐蚀的钢板而言,扫描速度过小会导致激光沉积能量过大,生成灰黑色的二次氧化层。对深层锈蚀的钢板除锈应依次采用低速低频、高速高频,以达到最佳除锈效果<sup>[36]</sup>。

清洗次数显然影响清洗的结果。多次清洗的方法可达到清洗厚锈蚀层的效果,但容易产生烧蚀效应损坏基底,同时降低清洗效率。沈全等<sup>[37]</sup>研究结果表明多次清洗有助于在适当的激光能量下提高清洗质量,但激光能量过高时,随着清洗次数的增多,基体表面可能受损。清洗次数也不宜过多,俞鸿斌<sup>[38]</sup>发现激光除锈扫描次数对除锈效果具有一定的饱和性,扫描次数大于3次后,清洗效果变化不大。

#### 4.3 频率和脉宽

脉冲宽度决定了辐射区的深度和热影响区域的大小,脉宽越大,热影响范围越大,但脉冲的能量降低,清洗深度就会减小;脉宽越小,清洗深度越高。脉冲频率

能量密度,直接决定除锈效果<sup>[4]</sup>。在除锈过程中,功率增大,材料表面吸收的能量密度也增大,锈蚀与基材之间剧烈的振动、烧蚀、气化等物理化学反应随之增强,引起更多的锈蚀从基材上分离,清洗效率明显提高。D'Addona等<sup>[34]</sup>研究了厚度为20~25 μm锈蚀的船用钢板进行焊前激光除锈工艺,结果表明,通过增大激光平均功率或激光光源的方式可以观察到除锈效率明显提升。

光斑的大小可以决定激光的扫描面积和除锈效率。由式(1)可知,单个光斑面积过小时,搭接率较低,清扫面积过小,清洗效率降低;光斑面积过大时, $F$ 降低,清洗效率也较低<sup>[29]</sup>。王凯杰等<sup>[4]</sup>利用激光分析仪得出在理想情况下,亮斑横截面积的形状与能量分布一致,近似高斯分布,如图3所示。

决定了单位时间内照射在待清洗层上脉冲激光的次数。当脉冲频率太低时,即激光传递的能量低,锈层吸收的能量水平不足以离开基体,清洁水平下降;脉冲频率太高,能量密度降低,清洗效果也会下降<sup>[39]</sup>。

Zhang等<sup>[40]</sup>在研究了分别用脉冲频率分别为1 kHz和2 kHz的数值照射Cu表面进行激光清洗后所形成的弹坑进行对比时发现,1 kHz下产生的弹坑比2 kHz产生弹坑浅且窄;还发现在2 kHz下5次脉冲后的弹坑深度大致等于在1 kHz下7次脉冲后的弹坑深度;显然,在高重复率的情况下需要较低的脉冲数。

#### 4.4 扫描间距和离焦量

在激光去除腐蚀严重或表面覆盖锈层的基体时,需要激光扫描到清洗表面的每一处。为了实现这种表面激光除锈激光照射的完全覆盖,要求如图4(a)所示的对角光斑距离 $d_3$ 小于等于亮斑的直径 $d$ ,为实现所有方向上相同性能的清洁, $d_1$ 必须等于 $d_2$ ;当 $d_3$ 小于 $d$ 时,条件得到满足,光斑搭接后覆盖所有的基板<sup>[41]</sup>。然而一般要求完整覆盖的实验较少,大多数实验通过控制搭接率就能解决系统误差,图4(b)为光斑搭接率示意图,式(4)、式(5)分别为光斑左右搭接率与上下搭接率:

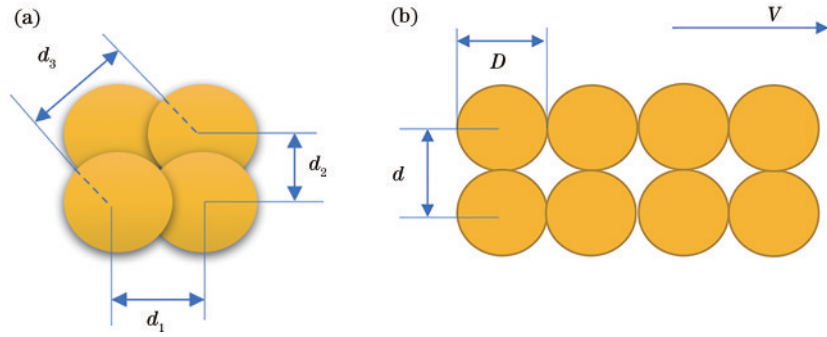


图 4 搭接效果图。(a)表面覆盖示意图;(b)光斑搭接率示意图

Fig. 4 Lapping effect diagram. (a) Schematic diagram of surface covering; (b) schematic diagram of spot lap rate

$$\eta_{\text{left-right}} = 1 - \frac{v}{D \cdot f}, \quad (4)$$

$$\eta_{\text{up-down}} = 1 - \frac{d}{D}, \quad (5)$$

式中： $\eta_{\text{left-right}}$ 、 $\eta_{\text{up-down}}$  为光斑左右搭接率与上下搭接率； $D$  为光斑直径； $d$  为上下两个光斑中心距离； $f$  为重复频率； $v$  为扫描频率。

李华婷等<sup>[42]</sup>研究发现,当搭接率达到 60% 时,热累积造成的表面损伤会增加粗糙度,通过电化学腐蚀试验,发现腐蚀电流密度急剧增加,耐蚀性下降。邱兆飏等<sup>[43]</sup>对不同腐蚀程度的船用钢板的激光除锈技术工艺进行优化,以锈层去除率作为主要评价指标,发现光斑搭接率在 50%~60% 范围内除锈效果最好。杨明昆<sup>[44]</sup>发现在扫描间距较小时,通过减少扫描次数或降

低激光能量密度才能达到理想的除锈效果。

设置不同的离焦量,即单排激光的焦点与待清洗物表锈层表面距离的改变,会导致作用在样品表面的能量密度不同,造成清洗效果的差异,如图 5 所示。由图 5(a)、图 5(b)可知,金属基体表面仍有锈蚀附着,因为锈蚀距离单排激光焦点较远,光斑面积偏大,激光的功率密度偏低,吸收的能量不足以使锈层完全脱落。当单排激光焦点在锈层上时,光斑焦点非常小,即激光功率密度过大,基板产生烧蚀效应,被严重氧化,如图 5(c)所示。对比图 5(a)和图 5(e)、图 5(b)和图 5(d)可知,当锈蚀距离单排激光焦点相同时,正离焦的清洗效果会比负离焦效果好一些,因为正离焦的焦点在基体表面上方,激光产生等离子体的膨胀效应产生的冲击波将增强对锈层的清洗<sup>[45]</sup>。

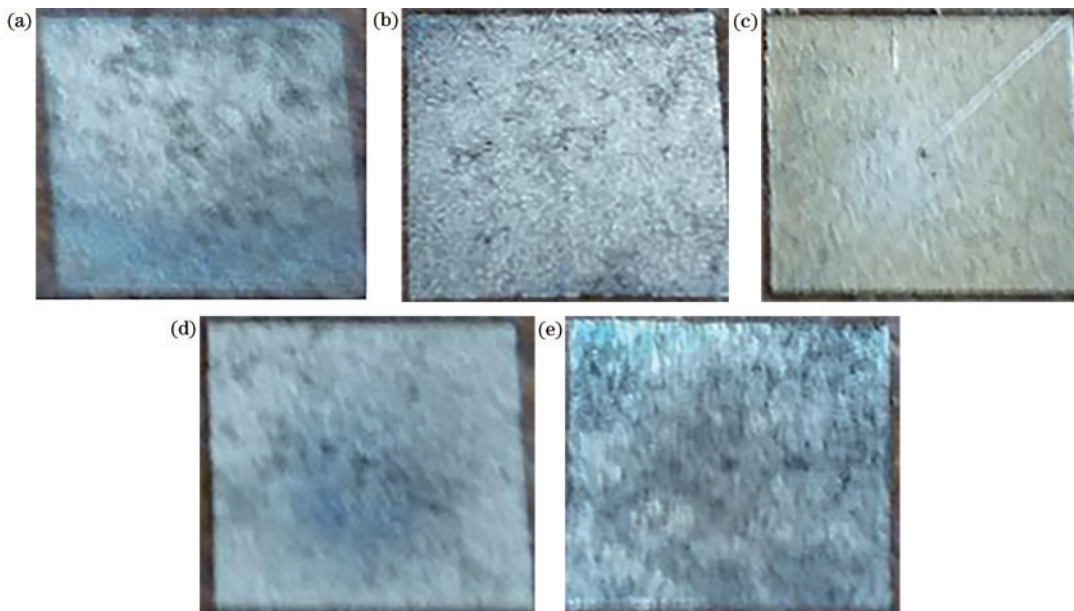


图 5 不同离焦量下激光除锈的实际效果图<sup>[45]</sup>。(a) +3 mm; (b) +2 mm; (c) 0 mm; (d) -2 mm; (e) -3 mm

Fig. 5 Actual rendering of laser derusting under different defocus quantities<sup>[45]</sup>. (a) +3 mm; (b) +2 mm; (c) 0 mm; (d) -2 mm; (e) -3 mm

## 5 与其他相关技术的结合应用

理论上采用一种激光除锈工艺,就可以满足一般

产品的除锈需求,但实际上要实现大规模的工业化应用,以及从效率、安全的角度考虑,激光除锈技术与其他相关技术的结合是有效的,可以提高效率,保证安全

施工;应用在工业生产中的激光清洗设备一般包括激光器、光束传输和聚焦、扫描器、监测器 4 个单元<sup>[19]</sup>。

表 4 为激光除锈技术与其他相关技术结合的相关设备。

表 4 与相关技术结合激光除锈设备

Table 4 Laser derusting equipment combined with related technologies

Model	Performance (power)	Application	Advantages
Nankai University electro-optical Q-switching	Input power: 3500 W Input voltage: AC 220 V	Paint layer and thinner metal etching layer	Cleaning efficiency is improved by using a seven-joint mechanical arm combined with the platform
Nankai University acousto-optic Q-modulated	Laser wavelength: 1064 nm Laser output power: CW 100 W (QCW 40W)	Paint layer and thinner metal etching layer	Closed cavity transmission of laser using energy transmitting fiber makes the incident light flexible and convenient for manual operation
CCD machine vision rust removal system	Laser wavelength: 1064 nm Maximum average output power: 100 W	Rust layer of most substrates	Combined with the vision system, the rust area can be intelligently identified and fixed-point removal can be realized

### 5.1 与视觉技术结合的智能除锈

目前,激光除锈设备都需人工操作,但激光除锈技术要想取代传统除锈工艺的目标,就必须向自动化和智能化的方向发展。因此,将机器视觉检测识别表面锈迹,实现定点清除的智能除锈方式非常流行<sup>[46]</sup>。许多学者在视觉处理方面进行了研究,Saravanan 等<sup>[47]</sup>利用机器视觉系统配合合适的算法,有效实现了污染物的监测和在线清除。史天意等<sup>[48]</sup>实现了监测激光清洗铝合金表面氧化物的行为。张晓等<sup>[46]</sup>采用 PyPython 及 OpenCV 视觉库的结合方法对 16Mn 钢表面进行识别和信息采集,使用 100 W 的激光进行除锈,结果表明,机器视觉辅助激光智能除锈系统可以更加快速、有效地识别锈蚀区域、选择算法、匹配相应的工艺参数,从而提高加工效率。图 6 为其实验时所用的智能除锈系统,图 7 为工作流程图。

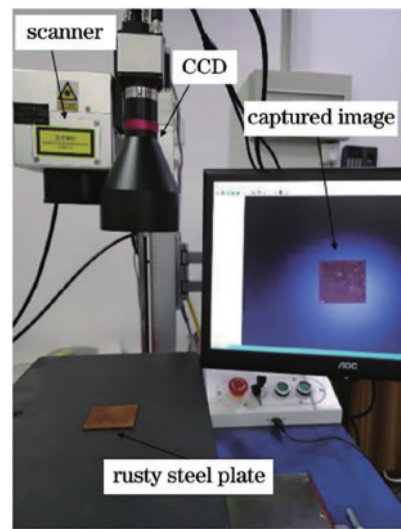


图 6 激光智能除锈设备图<sup>[46]</sup>

### 5.2 结合声、光检测技术的除锈监测系统

激光除锈的实质是激光与锈蚀层的相互作用,处理过程中会产生大量的声、光、电、热信号<sup>[49]</sup>。因此,监测类型可以分为声检测和光检测两种方式<sup>[50-51]</sup>。

Lee 等<sup>[52]</sup>基于色度调制技术,开发了一种激光清洗过程表面在线监测系统。该监视器产生的测量值取决于表面反射光的光谱特征,与光强度无关,结果表

明,由色度检测得到的光谱参数能清楚地反映表面清洁度和表面损伤,也能从其特性中获得大量的表面色度信息。Moretti 等<sup>[53]</sup>研究了光学相干层析成像(OCT)和反射傅立叶红外光谱(FTIR)光谱联合使用对激光清洗程序进行原位非侵入性评估的潜力,表明激光诱导荧光(LIF)技术与 OCT 和 FTIR 结合是一种

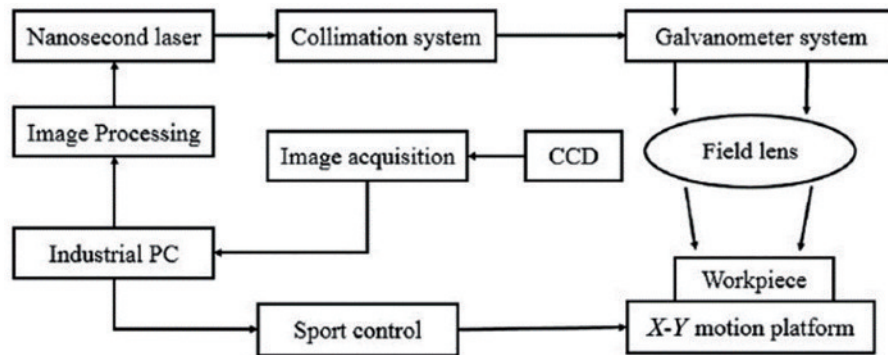


图 7 工作流程图<sup>[46]</sup>

Fig. 7 Working flow chart<sup>[46]</sup>

有效的方法。George 等<sup>[54]</sup>指出光成像技术在强散射介质中具有高灵敏度,可以有效地应用在监测文化遗产上进行激光清洁干预。孙兰香等<sup>[55]</sup>建立了激光清洗在线监测模型如图 8 所示,确定了能量阈值,采取均值平滑去除背景法、DBSCAN 算法、皮尔逊相关系数分析法等有效评判激光的清洗结果。

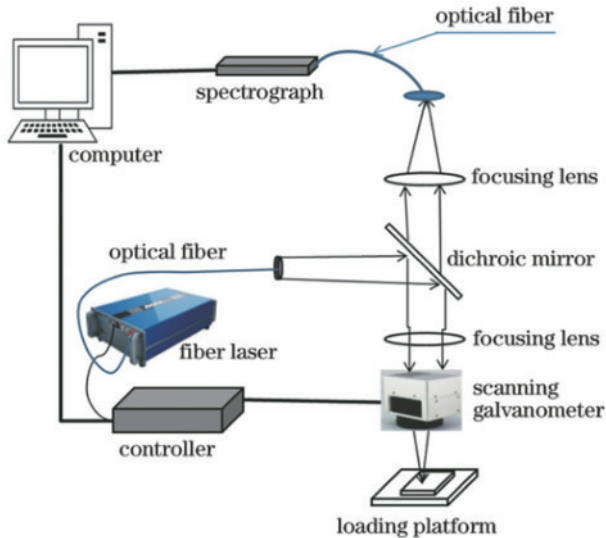


图 8 激光清洗监测结构示意图<sup>[55]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of laser cleaning monitoring structure<sup>[55]</sup>

## 6 结 论

综上所述,激光除锈技术在船舶领域的发展前景是可观的,对其机理的研究以及激光监测技术、智能激光除锈系统等与其他相关技术的结合也处于蓬勃发展的状态。但要想实现激光除锈技术在船舶领域实施较大规模的应用还需解决以下问题:

1) 在理论研究方面,激光除锈是一种包含震荡、气化、等离子体冲击、烧蚀等复杂物理化学变化的过程,很难去定量描述。微观方面,每个粒子所接受的激光能量不同,所产生的三维效应差别也很明显,数以万计的粒子之间所产生的场强影响更加难以用完整的数学模型来解释。

2) 在参数选择方面,理想的智能激光除锈系统通过电脑识别基体材料、锈蚀程度、锈蚀区域,自动匹配这种材料、锈蚀程度的最优除锈工艺参数;但实际上,行业中未形成这样一套工艺参数数据库供实际参考。因此,确定不同的材料、不同锈蚀程度与工艺参数的最优匹配标准,并建立不同污染物的激光除锈数据库,可以为激光除锈技术在船舶领域的较大规模应用提供支撑。

3) 在实际应用方面,目前,激光除锈技术在国内船舶领域的应用正处于机理研究和实验室验证的阶段,相关除锈设备尚未真正应用于船舶预处理流程。因为人工除锈作业已经大规模进行且激光清洗设备价

格相对昂贵,不利于激光清洗设备在造船行业的推广应用。

不可否认,未来要求船舶的大环境一定是绿色的。激光除锈技术的迅速发展,在船舶以及其他领域的应用前景巨大。可以促进相关产业的智能化、效率化,为产业长期、安全的发展注入动力。

## 参 考 文 献

- [1] Conde A, Colaço R, Vilar R, et al. Corrosion behaviour of steels after laser surface melting[J]. *Materials & Design*, 2013, 21(5): 441-445.
- [2] 张燕, 黄亚平. 船用钢板激光除锈工艺的有限元模拟及参数优化[J]. *应用激光*, 2020, 40(2): 294-299. Zhang Y, Huang Y P. Finite element simulation and parameter optimization of laser rust removal technology for marine steel plate[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(2): 294-299.
- [3] 张若楠, 韦朋余, 蒋泽, 等. 船舶建造领域激光除锈技术研究与应用现状[J]. *激光杂志*, 2021, 42(5): 1-9. Zhang R N, Wei P Y, Jiang Z, et al. Research and application status of laser derusting technology in shipbuilding field[J]. *Laser Journal*, 2021, 42(5): 1-9.
- [4] 王凯杰. Q235 碳钢脉冲激光除锈工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017. Wang K J. Study on pulsed laser derusting process of Q235 carbon steel[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [5] 陆思远. 激光清洗锈蚀钢板的技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017. Lu S Y. Technical study on laser cleaning of rust on steel surface[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [6] 朱明. Q345C 钢锈层的纳秒激光清洗工艺与表面质量研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020. Zhu M. Study on nanosecond laser cleaning process and surface quality of stainless steel Q345C[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [7] Saklakoğlu N, Bolouri A, Irizalp S, et al. Effects of shot peening and artificial surface defects on fatigue properties of 50CrV4 steel[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112: 2961-2970.
- [8] Xiao H B, Du C L, Zhang S L, et al. Study on the surface morphology of micro-particles and the oxide layer on silicon carbide crystal using nanosecond green laser cleaning assisted with airflow[J]. *Crystals*, 2022, 12(12): 1788.
- [9] Salimbeni R, Pini R, Siano S. A variable pulse width Nd: YAG laser for conservation[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, 4: 72-76.
- [10] Korenberg C, Baldwin A. Laser cleaning of iron[M]// *Lasers in the conservation of artworks VIII*. Boca Raton: CRC Press, 2010: 123-128.
- [11] Hsu S C, Lin J. Removal mechanisms of micro-scale particles by surface wave in laser cleaning[J]. *Optics & Laser Technology*, 2006, 38(7): 544-551.



- [12] Luk'yanchuk B S, Arnold N, Huang S M, et al. Three-dimensional effects in dry laser cleaning[J]. *Applied Physics A*, 2003, 77(2): 209-215.
- [13] Chen G X, Kwee T J, Tan K P, et al. High-power fibre laser cleaning for green shipbuilding[J]. *Journal of Laser Micro*, 2012, 7(3): 249-253.
- [14] Choubey A, Vishwakarma S C, Vachhani D M, et al. Study and development of 22 kW peak power fiber coupled short pulse Nd:YAG laser for cleaning applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 62: 69-79.
- [15] 杨明昆, 周仿荣, 马仪, 等. 激光除锈技术及其发展现状[J]. *清洗世界*, 2018, 34(10): 37-42.  
Yang M K, Zhou F R, Ma Y, et al. Laser derusting technology and its application[J]. *Cleaning World*, 2018, 34(10): 37-42.
- [16] 徐传义, 徐兴宽. 超光滑光学基片表面激光清洗机理与技术[J]. *西北工业大学学报*, 2002(1): 128-131.  
Xu C Y, Xu X K. Mechanism and technology of laser cleaning of ultra-smooth optical substrate surface[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2002 (1): 128-131.
- [17] 田彬. 干式激光清洗的理论模型与实验研究[D]. 天津: 南开大学, 2008.  
Tian B. Theoretical model and experimental study on dry laser cleaning[D]. Tianjin: Nankai University, 2008.
- [18] 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.  
Tong Y Q. Study on mechanism and application fundamentals of laser removal of metal oxides[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014.
- [19] 李伟. 激光清洗锈蚀的机制研究和设备开发[D]. 天津: 南开大学, 2014.  
Li W. Research on mechanisms of laser rust removal and manufacture of laser cleaning devices[D]. Tianjin: Nankai University, 2014.
- [20] 任志国, 吴昌忠, 陈怀宁, 等. 低碳钢的激光除锈机理及表面性能研究[J]. *光电工程*, 2017, 44(12): 1210-1216, 1246.  
Ren Z G, Wu C Z, Chen H N, et al. Mechanism of laser derusting and surface properties of low carbon steel[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(12): 1210-1216, 1246.
- [21] Yu H Y, Zhang Q M, Chen X, et al. Three-dimensional direct laser writing of biomimetic neuron interfaces in the era of artificial intelligence: principles, materials, and applications[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(3): 034002.
- [22] Yan J W, Huang N S, Deng H X, et al. First observation of laser-beam interaction in a dipole magnet[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(4): 045003.
- [23] Wei J C, Li P, Yu L P, et al. Mode-locked fiber laser of 3.5  $\mu\text{m}$  using a single-walled carbon nanotube saturable absorber mirror[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(1): 011404.
- [24] 李浩宇, 杨峰, 郭嘉伟, 等. 激光清洗的发展现状与前景[J]. *激光技术*, 2021, 45(5): 654-661.  
Li H Y, Yang F, Guo J W, et al. Development status and prospect of laser cleaning[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(5): 654-661.
- [25] 余晓畅. 基于脉冲固体激光器的激光清洗设备研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.  
Yu X C. Development of laser cleaning equipment based on pulse solid-state laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [26] 朱相荣, 王相润. 金属材料海洋腐蚀与防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.  
Zhu X R, Wang X R. Corrosion and protection of metals in marine environment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
- [27] de la Fuente D, Alcántara J, Chico B, et al. Characterisation of rust surfaces formed on mild steel exposed to marine atmospheres using XRD and SEM/Micro-Raman techniques[J]. *Corrosion Science*, 2016, 110: 253-264.
- [28] 雷正龙, 孙浩然, 陈彦宾, 等. 不同激光清洗方法对高强度钢表面锈蚀层的去除研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0702003.  
Lei Z L, Sun H R, Chen Y B, et al. Elimination of rusting layer from high-strength steel surface using different laser cleaning methods[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0702003.
- [29] Koh Y S, Powell J, Kaplan A, et al. Laser cleaning of corroded steel surfaces: a comparison with mechanical cleaning methods[M]//Nimmrichter J, Kautek W, Schreiner M. *Lasers in the conservation of artworks*. Springer proceedings in physics. Heidelberg: Springer, 2007, 116: 13-20.
- [30] Zapka W, Ziemlich W, Leung W P, et al. "Laser cleaning" removes particles from surfaces[J]. *Microelectronic Engineering*, 1993, 20(1/2): 171-183.
- [31] Zapka W. The road to 'steam laser cleaning' [M]. Singapore: World Scientific, 2002: 23-48.
- [32] Chen G X, Kwee T J, Tan K P, et al. Laser cleaning of steel for paint removal[J]. *Applied Physics A*, 2010, 101(2): 249-253.
- [33] 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.
- [34] 张光星, 华学明, 李芳, 等. 激光除锈、除漆的研究与应用现状[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(18): 1-4, 8.  
Zhang G X, Hua X M, Li F, et al. Research and application status of laser de-rusting and de-painting[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(18): 1-4, 8.
- [35] Brygo F, Dutouquet C, Le Guern F, et al. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(6): 2131-2138.
- [36] 邱兆飏, 朱海红. 脉冲激光除锈工艺研究[J]. *应用激光*, 2013, 33(4): 416-420.  
Qiu Z B, Zhu H H. Process parameter study on the removing rust using pulsed laser[J]. *Applied Laser*, 2013, 33(4): 416-420.
- [37] 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, 44(6): 605-608.

- Shen Q, Tong Y Q, Ma G D, et al. Study on surface roughness of the substrate after laser derusting[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(6): 605-608.
- [38] 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, 34(4): 310-314.  
Yu H B, Wang C M, Wang J, et al. Research on the laser de-rusting of carbon steel surface[J]. *Applied Laser*, 2014, 34(4): 310-314.
- [39] 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.
- [40] Zhang J, Wang Y N, Cheng P, et al. Effect of pulsing parameters on laser ablative cleaning of copper oxides[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(6): 064902.
- [41] 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.
- [42] 李华婷, 周建忠, 孙奇, 等. 基于激光清洗的 AH32 钢的电化学腐蚀性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(21): 211403.  
Li H T, Zhou J Z, Sun Q, et al. Electrochemical corrosion properties of AH32 steel via laser cleaning[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(21): 211403.
- [43] Lu Y F, Song W D, Hong M H, et al. Mechanism of and method to avoid discoloration of stainless steel surfaces in laser cleaning[J]. *Applied Physics A*, 1997, 64(6): 573-578.
- [44] 杨明昆, 周仿荣, 马仪, 等. 深度锈蚀钢板的激光除锈工艺研究[J]. *应用激光*, 2018, 38(6): 975-980.  
Yang M K, Zhou F R, Ma Y, et al. Laser rust removing process of deep rusting steel plate[J]. *Applied Laser*, 2018, 38(6): 975-980.
- [45] 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: 11-18.
- [46] 张晓, 王明娣, 刘金聪, 等. 基于机器视觉的激光智能去除锈蚀的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(8): 0814001.  
Zhang X, Wang M D, Liu J C, et al. Laser intelligent rust removal based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0814001.
- [47] Saravanan D. Machine vision for detection contaminations technique of cotton[J]. *Man-Made Textiles in India*, 2019, X7(12): 409-413.
- [48] 史天意, 周龙早, 王春明, 等. 基于机器视觉的铝合金激光清洗实时检测系统[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0402007.  
Shi T Y, Zhou L Z, Wang C M, et al. Machine vision-based real-time monitor system for laser cleaning aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0402007.
- [49] 丁焯, 薛遥, 庞继红, 等. 激光加工在线监测技术研究进展[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(4): 044201.  
Ding Y, Xue Y, Pang J H, et al. Advances in *in situ* monitoring technology for laser processing[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(4): 60-78.
- [50] 何宾, 姜伟, 樊志勇, 等. 激光除锈在海洋工程建造领域的应用前景[J]. *涂层与防护*, 2020, 41(4): 40-45.  
He B, Jiang W, Fan Z Y, et al. Application of rust-removing laser in marine engineering construction[J]. *Coating and Protection*, 2020, 41(4): 40-45.
- [51] 佟艳群, 张永康, 姚红兵, 等. 基于等离子体光强信号的激光除锈实时监测系统[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1003009.  
Tong Y Q, Zhang Y K, Yao H B, et al. Real-time monitoring system for laser derusting based on plasma intensity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(10): 1003009.
- [52] Lee J M, Steen W M. In-process surface monitoring for laser cleaning processes using a chromatic modulation technique[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 17(4): 281-287.
- [53] Moretti P, Iwanicka M, Melessanaki K, et al. Laser cleaning of paintings: *in situ* optimization of operative parameters through non-invasive assessment by optical coherence tomography (OCT), reflection FT-IR spectroscopy and laser induced fluorescence spectroscopy (LIF)[J]. *Heritage Science*, 2019, 7(1): 1-12.
- [54] Tservelakis 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): 6-98.
- [55] 孙兰香, 王文举, 齐立峰, 等. 基于激光诱导击穿光谱技术在线监测碳纤维复合材料激光清洗效果[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1111003.  
Sun L X, Wang W J, Qi L F, et al. Online monitoring of laser cleaning effect of carbon fiber composite materials based on laser-induced breakdown spectroscopy technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1111003.