

水下激光修复研究现状与发展趋势

薛龙, 毛雪松, 黄继强, 张瑞英, 王璆
(北京石油化工学院, 光机电装备技术北京市重点实验室, 北京, 102617)

摘要: 海洋装备的维修养护与事故抢修技术既是人类进行远洋探索与资源开发的重要保障, 又是核电站、水利工程等重要基础设施在役运维的有力技术支撑, 而水下激光修复正是这一领域中极具前景的解决方案之一。激光修复技术作为陆地上常规环境中的优势技术, 近年来也在水下环境中有了长足的发展, 已在海洋油气资源的开采与运输、船舶应急维修、船坞港口装备、水利工程、核动力工程等领域得到了广泛的关注与研究。为了进一步总结并分析水下激光修复技术所面对的问题与现有解决方案, 从水下激光修复技术的研究现状入手, 综述了水下湿法、高压干法和局部干法激光修复技术的工艺问题及其产生机理, 并分析对比了多种对应主流解决方案的改善效果与研究进展, 最后对水下激光修复技术的发展趋势进行了总结与展望。

创新点: (1) 从工艺问题及产生机理的角度进行总结, 并对比了主流解决方案。
(2) 提出了光束通道建立与蒸气和等离子体的顺利排出也密切相关的观点。

关键词: 激光修复; 水下焊接; 湿法; 高压干法; 局部干法

中图分类号: TG 456.5; TG 456.7

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20230513001

0 序言

海洋装备长期受水体腐蚀及波浪循环变载荷作用, 部分地区还要经受风暴、洋流、潮汐等环境侵蚀, 甚至是地震的影响, 服役环境十分恶劣, 而且海洋工程结构常使用厚大的高强钢结构板, 焊接接头多且类型复杂, 在长期服役过程中难免会产生锈蚀、裂纹等缺陷。据统计, 货运船舶的维修养护费用普遍占其总固定成本的 16% 以上^[1], 而使用水下修复技术能够缩短工期, 并节约大量养护费用。研究表明, 目前世界上约有 30% 的海洋平台正处于超期服役状态, 国内也有部分海洋平台已达到或超出设计寿命^[2], 可见海洋装备的维修养护需求正日益迫切。不仅如此, 远海服役的装备大多难以得到及时救援, 一旦发生事故将会造成重大财产损失甚至危及人员生命安全。因此发展水下修复技术是海洋装备应用与发展的重要基石, 对进一步探索远海、开发海洋资源也具有显著的现实意义。

水下增材修复技术是一类以焊接、表面熔覆、堆叠沉积等增材方式为基础, 直接在水下对破损结构进行修复的技术。迄今为止, 水下激光修复技术已经在海洋油气资源的开采与运输、船舶应急维修、船坞港口装备、水利工程、核动力工程等领域得到了广泛的关注与研究。随着高功率激光器的发展与普及, 使用激光为热源的修复技术凭借其功率密度高、热影响区小、热源均匀稳定等特点已经在陆上常规环境下成为了优势技术^[3]。而激光特有的高功率密度使其可以达到极高的熔深, 在常用厚大高强钢板的海洋工程结构的修复上具有独特优势^[4]。近年来也有许多学者专注于水下激光修复领域, 并在这一领域取得了丰硕的研究成果。未来, 水下激光修复技术的应用将进一步丰富水下修复技术储备, 为船舶、海洋平台、海底油气管道等海洋装备的水下原位修复作业提供全新的技术路线。

水下激光修复技术作为海洋装备维修养护与应急抢修领域的国家战略储备技术, 其重要地位在“北溪二号”事件愈演愈烈的如今更加凸显。虽然已经有部分研究就水下焊接或激光焊技术作了相应总结^[5-7], 但尚未见到聚焦于水下激光修复工艺问题的产生机理及其解决方案的论述与总结。水下激

收稿日期: 2023-05-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB4601800); 北京市科技成果概念验证项目: 水下激光增材局部干式修复系统 (2.55)。

光修复技术作为一种优势技术在新兴领域的前沿探索,到目前为止尚且不够成熟,仍存在一些诸如激光衰减、空化侵蚀、羽流堆积、淬硬等关键问题亟待解决.文中从工艺问题出发分别对湿法、高压干法、局部干法三种形式的水下激光修复技术进行分析,并总结其发展趋势.

1 水下激光增材修复现有问题

水下激光修复依照对水环境的防护程度分为水下湿法、高压干法与局部干法三类.湿法即直接在水环境进行修复,是设备最简单、灵活性最强的一种方式;高压干法即在密封的高压干舱中进行修复,其系统复杂、成本高,主要用于修复难度大、质量要求高的情形^[8];局部干法则是一种使用特制的排水罩,仅排空熔池周边的液体从而创造出局部干腔进行修复的方法,兼顾了隔水效果与设备的灵活性,是一种折中方案.

1.1 水下湿法激光修复

虽然早在上世纪九十年代 Shannon 等人^[9-10]就进行了激光湿法的可行性与基础机理研究,但由于水环境对激光的强烈干扰,水下湿法激光修复技术到目前为止依然存在许多亟待解决的问题.

纯水的吸收系数主要由入射激光的波长决定,波长为 $1.064\ \mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 激光的吸收系数约为 $0.17\ \text{cm}^{-1}$,波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光,吸收系数则大于 $100\ \text{cm}^{-1}$,如图 1 所示^[11],故使用不同泵浦源的激光器进行的湿法试验往往会得出截然不同的结论,这也决定了用于水下湿法研究的激光器波长应当避开水体吸收峰.

秦航等人^[12]使用光纤激光器对 TC4 钛合金进行了湿法激光焊试验,结果表明湿法激光焊在水深达到 8 mm 左右时便已无法进行;Guo 等人^[11]在研究穿透水层深度对激光焊的影响时也得到了类似的结果,并指出光束通道的形成是水下湿法激光焊能够顺利进行的关键.随着水深的不断增加直至超过某个临界,光束通道会变得不稳定,并直接导致焊接无法进行.因此,湿法激光修复技术到目前为止仅能在极浅水深下获得较好的修复效果.

邢霄等人^[13]认为在达到临界水深前,焊接热作用产生的蒸气云会将水体持续排开以形成稳定的光束通道,并在其研究中将超过临界水深的激光修复过程描述为一种不稳定的周期性焊接行为,即蒸

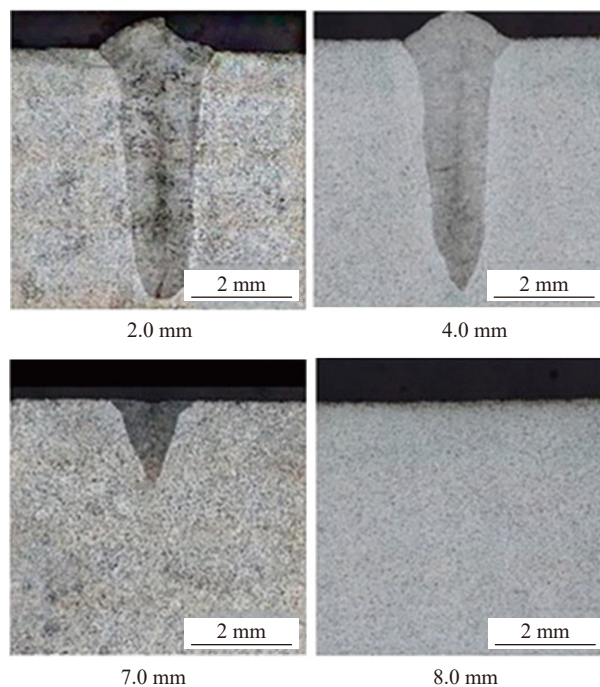


图 1 不同水深下的激光焊效果^[11]

Fig. 1 Laser welding under different water depth

气团不断出现、涨大、破开水面、蒸气排出导致压力降低、水面开口闭合的循环过程.在这个过程中,光束通道周期性的建立与关闭导致了焊接过程的不稳定.当激光能量密度超过阈值,蒸气云中心位置的气体在吸收足够能量之后会发生电离成为低温等离子体^[14].Zhang 等人^[15-16]对 Nd:YAG 激光水下湿法激光焊光发射的研究中发现,光发射信号在更深的水层下 (10 mm) 停止了周期性波动,由相对稳定的强紫外辐射与弱红外辐射组成,认为此时已不存在正常的焊接过程,且产生了大量强紫外放射的等离子体,这些等离子体对激光的强烈屏蔽使焊接无法进行.故水下湿法激光修复技术的关键瓶颈在于焊接时的激光能量衰减,这种衰减主要由水体的折射吸收和蒸气与等离子体云的屏蔽产生,如图 2 所示.

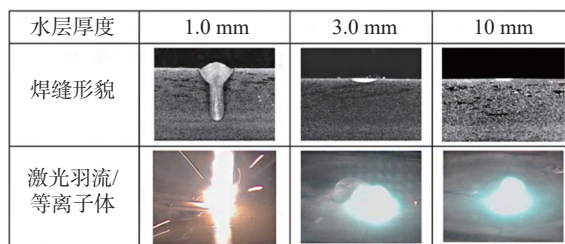


图 2 水下湿法焊接中的激光诱导等离子体^[15]

Fig. 2 Photoinduced plasma in underwater wet welding

值得注意的是,在相当比例的文献中都仅将光束通道的建立与气体排开水层形成空腔联系起来,

但 Zhang 等人^[17]研究表明,理想水体对波长为 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的 Nd: YAG 激光的吸收率仅为 0.014 mm^{-1} . 这意味着其在穿透 30 mm 的水层后,仍能保留约 75% 的能量; Mullick 等人^[18] 则构建了集总参数分析模型,以定量估算水环境对激光的衰减,其结果也表明,在设定的工艺参数范围内,蒸气与等离子体云的散射与吸收占总热损失的 38%~52%,是造成激光功率损失的最主要因素,同比水体对流带来的热损失仅占总热损失的 8%~16%. 可见蒸气与等离子体云是导致入射激光衰减的主因,其带来的能量损失甚至比水体所导致的更加严重. 如果其不能顺利的从激光路径上排出或清除,光束通道亦无法形成,故应当意识到光束通道的建立与蒸气与等离子体云的顺利排出或清除也是密切相关的.

秦航等人^[19] 在工艺参数对焊缝成形的影响研究中指出,提高激光功率能够在一定范围内增大可焊水深,并有利于获得连续且成形良好的焊缝(图 3). Guo 等人^[11] 也注意到在激光功率 3.0 kW 、焊接速度 0.6 m/min 时,可焊水深仅有 7 mm ;在激光功率 6.0 kW 、焊接速度 0.1 m/min 时,可焊水深超过了 20 mm . 可见增大线能量是提高可焊水深的有效措施之一,但过高的功率密度会使水体沸腾的更加剧烈,从而增加水体射流对熔池的干扰,所以提高功率密度对焊接质量的改善也存在较大限制.

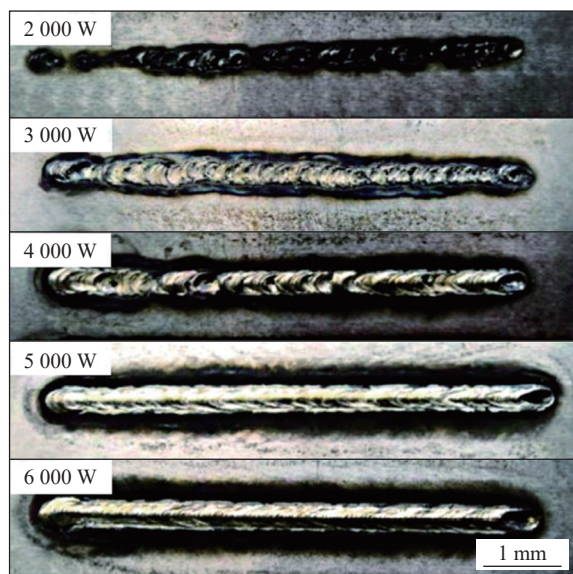


图 3 水深 4 mm 激光功率对成形效果的影响^[19]

Fig. 3 Influence of laser power on forming effect under 4 mm deep water layer

Sakate 等人^[20] 在焊接时引入了速度 2 m/s , 方向平行于基板且与焊接方向相反的水流,有效加速

了蒸气与等离子体云的去除,从而得到了更大的可焊深度; Wen 等人^[21] 在进行水下湿法激光焊试验时将一种主要由 CaCO_3 , CaF_2 , TiO_2 , Si, Mn, 基材粉末和环氧树脂组成的辅助防护材料涂覆在基板上,成功提高了可焊深度,并抑制了焊缝的氧化与氢裂. 该团队在其另一项研究中将涂覆材料的防护机理描述为: CaCO_3 在焊接时产生了电离能更高的气体 (CO_2) 稀释了水蒸气的浓度,从而大大降低了气团整体的电离程度; CaF_2 用于抑制氢裂; TiO_2 , Si 和 Mn 则抑制了有害金属氧化物的形成^[22]. 秦航等人^[19] 在含有类似造气剂 (CaCO_3) 与造渣剂 (CaF_2 和 TiO_2) 的涂覆材料中添加了 Al 与 Fe_2O_3 , 利用其反应热间接增大了热输入,以降低焊缝的热裂纹敏感性.

除了入射激光的衰减,气泡与水流扰动也是水环境对湿法激光修复的重要影响因素,其中最直接的便是水-气界面的折射与反射,有研究表明在水下湿法激光修复中,适当的额外负离焦量有利于焊缝的成形^[19]. 作为参考,吴广成等人^[23] 在水下激光传输光束空间分布的研究中得出了水体对激光的总体影响会使光斑趋于扩展的结论,且能量衰减越强烈,光斑扩展也越明显.

湿法激光焊还会产生氧化、氢裂、气孔等缺陷,冯相如等人^[22] 认为其成因与激光诱导空化和水体爆炸沸腾密切相关. 目前已有大量研究表明,高能量密度的激光能够诱导空化,且空化侵蚀已经被应用在了激光切割、雕刻、精密微成形等领域^[24-27]. Zhao 等人^[28] 对激光诱导空化气泡动力学的研究表明,空泡产生之后会不断膨胀直至内部压力小于其饱和蒸气压后崩溃,空泡会如此震荡数次直至泡中气体完全液化或溶解; Chen 等人^[29] 认为空化的破坏力主要体现在当空泡在壁面(固体壁面或者任何具有粘度差的界面)附近溃灭时会受非均匀压力场的影响,产生一个指向壁面的高速液体射流,其试验表明,空泡的存在时间与液体射流的冲击力都会随激光能量的增加而增大;强豪等人^[30] 则更详细的分析了不同激光能量密度下空泡的脉动次数与溃灭时对靶材的能量耦合效率.

蔡志海等人^[31] 在铝青铜的湿法激光焊中发现,空泡溃灭时的水射流使水分侵入熔池并形成了大量气孔,致使焊缝表面起伏,并带来了严重的氧化,之后该团队使用在基材表面预置助焊粉末的方法改善了焊缝成形; Kumar 等人^[32] 也在镍基材激光焊

的试验中指出水介质中的焊缝相较于气体中形成了更多的氧化物,且具有更高的显微硬度;Feng等人^[33]在镍铝青铜板的湿法激光修复中使用了具有锌与钛表皮的焊丝,利用低沸点金属锌作为造气剂以减轻激光诱导空化的破坏性影响,并使用钛增加表面张力,以提高熔池对高速水射流的抵抗能力。

水下湿法激光修复时水环境致使入射激光衰减和激光诱导空化侵蚀的作用机理虽然已经较为清晰,但目前还没有成熟有效的解决方案,该技术距离实用仍有较大差距。在已有的研究中,降低激光衰减的方案主要集中于使用气、水射流辅助吹除蒸气与等离子体云,或使用高电离能气体稀释水蒸气以降低电离度两个方面。而抵抗激光诱导空化水射流侵蚀、提升成形质量的方案则主要集中于预置助焊剂以提高熔池的表面张力,或使用气化覆层保护熔池。

1.2 水下高压干法激光修复

水下干法是一种在压力舱室中使用压缩气将水体排出,从而为激光修复提供干燥或半干燥作业环境的方法。其根据舱内压力可分为常压干法与高压干法,但常压干法要求压力舱室完全密封,作业费用与设备复杂程度远超高压干法,在实际工程中极少应用,故水下干法一般指高压干法。高压干法与陆上激光修复相比只受到环境压力一个因素影响,所以其能以稳定可靠的成形效果与焊接质量,成为高修复难度或高质量要求时的第一选择。

肖镌璐等人^[34]进行的高压干式激光熔覆表面修复试验显示,高压气体会使修复过程的稳定性降低,且存在较为严重的飞溅与烟尘。但只要工艺参数适宜,熔覆层仍能保持稳定的成形,很少有氧化、裂纹、气孔等缺陷产生。虽然高压气体会不会像水层那样对激光修复造成破坏性的影响,但为了充分了解高压干法激光修复法的特性,对其进行深入剖析依然是十分必要的。邵长磊等人^[35]发现系统的热损失随着压力的升高有所增加,同时烟尘和羽流也降低了激光的实际热输入,导致熔池的流动性降低、熔覆层堆高略有增加、熔宽略有减小;Pang等人^[36]则指出压力导致的基材熔、沸点变化也是熔池及匙孔形态变化的主因之一,环境压力的提高将导致熔池表面温度上升,使得形成匙孔所需的总吸热量增大,从而降低熔深,这一点在高压或亚大气压下均适用;Luo等人^[37]的研究表明,高压下金属沸点的提升还将降低匙孔形成与加深的速率,并

使得匙孔的形成更加稳定;Su等人^[38]则将上述原因综合并归结为加快了凝固速度,当环境压力从100 Pa增加至4.5 MPa时,焊缝的平均晶粒尺寸减小约37%,且受冷却方向变化的驱动,晶粒的生长方向明显从两侧向中心表面移动。

Wang等人^[39]在探究不同保护气体种类对水下激光焊组织和性能的影响时,在15 m的水深下对双相不锈钢S32101进行焊接试验,发现氮对奥氏体的形成有促进作用。使用氮气作为保护气体时,焊缝奥氏体含量为51.6%,相比于氩气(奥氏体含量为32.2%)有所提高。该团队在其另一项研究中进一步指出,氮在铁素体中的溶解度会随着温度的降低而降低,过饱和的氮容易与铬反应形成 Cr_2N ,造成部分区域铬耗尽,从而使得焊缝热影响区的耐点蚀能力降低^[40]。此外,氧化物的形成也可以归因于高压下的高氧气浓度,故在高压环境下对保护气体保护效果的要求也更严苛。

为了更加透彻的了解高压所导致的激光羽流变化,Luo等人^[41]在压力对激光焊接羽流影响的研究中表示,高压下激光的熔深可能由于羽流对入射激光的吸收与折射而严重降低,并分析称羽流可以被认为是金属蒸气与激光诱导等离子体的混合物。史俊锋^[42]在激光深熔焊数值模拟中发现,羽流对入射激光的影响不仅在于损耗,还会产生透镜效应偏转激光束,致使其光斑扩展、能量密度下降。

高功率激光作业时,熔池温度会迅速升高并形成金属蒸气,当金属蒸气与保护气体的混合物温度继续上升直至电子能量达到雪崩电离条件,气体电离形成光致等离子体^[43],而电子-原子的吸收系数很小,因此可仅考虑电子-离子吸收系数。又因为发生雪崩电离的电子能量密度阈值与激光波长的平方成反比,羽流造成的 CO_2 激光(波长为10.6 μm)损耗远高于相同条件下的Nd:YAG激光(波长为1.06 μm);Kawahito等人^[44]使用Nd:YAG激光器在常压下进行了20 mm厚的304不锈钢板焊接,其结果显示当激光功率达到10 kW时,光致等离子体所造成的最大衰减仅为4%;但Long等人^[45]发现在1.8 MPa压力下,激光焊所产生的羽流在高度方向上的膨胀率仅为常压(0.1 MPa)下的2.7%,这使得其对入射激光的屏蔽作用增加了12.97倍(图4),该团队在其另一项研究中使用了侧向气流进行辅助扩散,使羽流高度显著降低,并明显偏离了激光路径,改善了高压下激光的穿透能力^[46];孙

大为^[47]则在侧向气流辅助扩散的基础上总结了不同气体流量的吹扫效果与对应的等离子体温度、体积、三维形态及吸收系数变化; Qiu 等人^[48]采用无源电探针检测羽流等离子体的电信号, 并使用高速 CCD 相机同步记录其形态, 发现探针与基板间的电压增加标志着等离子体的收缩, 该团队之后建立了电信号与等离子体形态之间的表征关系, 并基于此对等离子体的波动特性进行了分析。

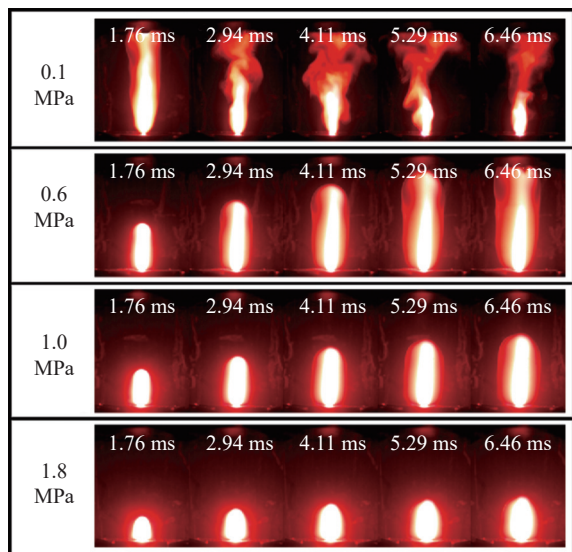


图 4 不同压力的光致等离子体云瞬态膨胀行为^[45]

Fig. 4 Photoinduced plasma transient expansion behavior under different pressures

水下高压干法激光修复技术是目前修复环境最优、修复质量最高的水下激光修复技术, 其只有环境压力一个特殊影响因素, 且高压所带来的羽流扩散缓慢等问题也存在有效的解决方案. 工程应用主要的限制来自于复杂的压力舱室搭建, 而非激光修复工艺, 在技术成熟度方面有着较大优势。

1.3 水下局部干法激光修复

水下局部干法激光修复技术是使用特制排水罩创造局部干腔, 以排除水环境对激光与熔池影响的水下修复技术, 其既能够提供较为适宜的修复环境, 又在一定程度上保证了修复装备的灵活性. 水下局部干法激光修复如今已经能够达到较好的修复效果, 且实现了少量工程应用. 2009 年, 日本东芝公司就使用水下局部干法激光修复技术针对核反应堆乏燃料池的开裂研发了一套维修与预防性养护设备^[49], 该技术还曾被应用于水下钢结构焊接等领域^[50].

水下局部干法激光修复技术的主要问题来自高冷却速率与高压, 与高压干法相比水仅有冷却

速率与流场的差异. 姚杞^[51]在其不锈钢焊接研究中指出水下局部干法的高冷却速率主要来自水环境, 保护气体流量带来的影响并不显著; 李丛伟等人^[52]在 304 不锈钢局部干法激光熔覆中重点研究了熔覆层的组织和性能, 发现了快速冷却所导致的焊缝硬度上升与部分奥氏体发生马氏体转变的现象; Di 等人^[53]在研究水下高冷却速率对 E550 钢焊缝组织的影响中发现, 焊缝材料中的 Ti 和 Mn 出现了明显的损耗区 (图 5), 并分析称这是由于在析出时针状铁素体更容易在 Ti 和 Mn 氧化物上成核, 这些夹杂物的形成显著消耗了周围基体中的 Ti 和 Mn, 但在高冷却速率下熔融金属难以扩散与均质化, 从而形成损耗区; Luo 等人^[41]的研究表明水下的强冷却环境使得激光焊熔池的上表面加速凝固, 并显著削弱了熔池上部的流场; 黄尊月等人^[54]研究了不同种类的活性剂 (一种广泛应用于改善焊接熔池形貌或组织和性能的方法^[55]) 对水下激光焊缝形貌与组织和性能的影响, 并制备了有效改善熔池深宽比并抑制表面氧化的活性剂. 需要注意的是, 海洋工程结构多使用高强钢厚大板材, 这类情况原本就容易引发弯曲变形或拘束裂纹, 而水下的强冷却环境会进一步加重冷、热裂纹与拘束裂纹的问题^[54,56]. 虽然这类影响多因材料而异, 但相关研究普遍认为水下环境带来的高冷却速率将使得填充部分的硬度提高、韧性与断后伸长率下降、某些成分分布不均 (非偏析), 其组织也会发生对应转变, 并在凝固表面留下更加清晰的鱼鳞纹。

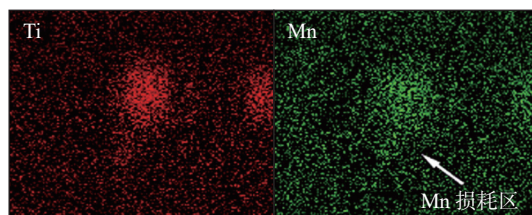


图 5 水下强冷却环境中形成的 Ti 和 Mn 损耗区^[53]

Fig. 5 Ti and Mn-depletion zone caused by high cooling rate

除了焊接之外, 表面熔覆也是一种重要的激光修复形式, 是水下表面修复等领域的关键技术. Guo 与 Fu 等人^[57-58]在水下激光丝材熔覆领域做了大量研究, 在对铝合金与钛合金的表面熔覆试验中观察到了明显的氧化与飞溅, 并认为这种现象由激光的散射引起. 由于水下强冷却环境, 沉积金属在基材上的润湿性、沉积角和流动性均有所下降, 表

面氧化膜的拘束和应力集中还引起了不同程度的以穿晶裂纹为主的冷裂纹(图6),之后该团队还尝试提高线能量以补偿热损失,成功减少了氧化、裂纹等缺陷并改善了熔覆层的组织性能^[59];在水下激光送粉熔覆方面,Liu等人^[60]在A32钢基板上制备了铁基涂层,并研究了送粉气流量、送粉速率、激光功率等工艺参数对沉积质量的影响.虽然水下激光表面熔覆主要应用于水下修复,但也有学者尝试使用水下局部干法激光增材沉积出了铝合金薄壁管道,并对沉积质量做了评估^[61].

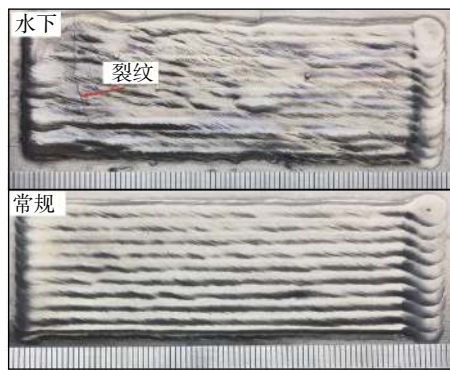


图6 水下和常规环境的激光熔覆层对比^[58]

Fig. 6 Comparison of laser cladding in local dry and normal environments

水下局部干法激光修复不论通过焊接还是表面熔覆,均已能够得到较为良好的修复效果,高冷却速率所造成的问题也能在良好工艺参数的调控下有效改善,但相较于更为成熟的水下局部干法电弧修复技术,其有待探索的方向还很多.

2 水下激光增材修复发展趋势

在前文总结的水下激光修复技术现状中,有多位学者都曾在基板上涂覆防护层,用以提高水下湿法激光修复的质量,却罕有将已在水下自动电弧焊中得到广泛关注的自保护药芯焊丝引入水下激光修复领域的研究^[62].还有学者提出使用侧吹气流对高压下的激光羽流进行吹扫,却未见利用排水罩现有流场实现高压羽流吹扫的设计.复合热源、外加磁场、超声波等已经被证明对激光修复质量有帮助的辅助能量形式,在水下激光修复领域也尚未引起足够关注^[63-65].足以见得水下激光修复技术还有较大潜力尚未被发掘出来.

从技术的角度出发,水下湿法激光修复目前存在入射激光衰减与空化水射流侵蚀两大已被证明

无法通过单纯的改良工艺参数解决的问题,使其发展受到了严重限制,主流观点认为主动吹扫蒸气与等离子云和引入焊接保护剂会是可能的突破口.水下高压干法与局部干法激光修复在试验条件下已经能够实现较高质量的水下作业,未来在这一领域的研究将可能集中于使其工艺匹配现有的高强度海工钢、船用钢,使其向着实用技术进一步转化.此外,依据常规环境下激光修复的现有研究,激光与磁场、超声波等辅助能量形式结合也可能有较高的研究价值.

目前水下修复门类下的工程应用高度集中于水下湿法药皮焊条手工电弧焊,在部分重大工程中,为保证施工质量也会采用水下高压干法,水下激光修复技术的实际应用案例尚不多见.但在大功率激光器逐渐国产化的如今,其与传统电弧热源的价格壁垒已不复存在.以此为基础,可以预见水下激光修复技术不论作为应急水下维修抢险的储备技术,还是作为水下装备常规养护的应用技术都有较大的发展前景.

3 结束语

(1) 水下湿法激光修复受人射激光衰减和激光诱导空化侵蚀两个问题的制约,尚无法达到实际修复需要,虽然两个问题都已有了多种改善的途径,但该技术距离实用依旧还有很长的路要走.

(2) 水下高压干法与局部干法激光修复技术均已在适宜工艺参数的调控下取得较为良好的修复效果,其高压、高冷却速率所带来的羽流扩散与匙孔形成缓慢、材料淬硬、氢裂等问题也已经存在较为有效的解决方案.

(3) 水下激光修复技术作为一种优势技术在新兴领域的前沿探索虽然尚未成熟,但随着高功率激光器的逐步普及与国产化,激光热源的修复技术凭借其功率密度高、热影响区小、热源均匀稳定等特点,有望弥补现有技术的不足,并为水下修复技术补全下一块拼图.

参考文献

[1] 董振华. 船舶维修保养技术经济性研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2009.

Dong Zhenhua. Research on ship maintenance technology and

- economy [D]. Dalian : Dalian Maritime University, 2009.
- [3] 赵永涛, 殷敏谦, 曾红军, 等. 海洋平台结构损伤检测研究 [J]. *中国海洋平台*, 2008, 23(5): 23 – 26.
- Zhao Yongtao, Yin Minqian, Zeng Hongjun, *et al.* Research on structural damage detection of offshore platforms[J]. *China Offshore Platforms*, 2008, 23(5): 23 – 26.
- [3] 王家淳. 激光焊接技术的发展与展望 [J]. *激光技术*, 2001(1): 48 – 54.
- Wang Jiachun. Development and prospect of laser welding technology[J]. *Laser Technology*, 2001(1): 48 – 54.
- [4] Sun G F, Wang Z D, Lu Y, *et al.* Investigation on microstructure and mechanical properties of NV E690 steel joint by laser-MIG hybrid welding[J]. *Materials & Design*, 2017, 127: 297 – 310.
- [5] Hino T, Tamura M, Tanaka Y, *et al.* Development of underwater laser cladding and underwater laser seal welding techniques for reactor components[J]. *Journal of Power and Energy Systems*, 2009, 3(1): 51 – 59.
- [6] 王伟, 王泽明, 魏连峰, 等. 水下激光加工技术在核电维修领域的应用现状及发展 [J]. *电焊机*, 2020, 50(7): 74 – 79.
- Wang Wei, Wang Zeming, Wei Lianfeng, *et al.* Application status and development of underwater laser processing technology in the field of nuclear power maintenance[J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(7): 74 – 79.
- [7] Sun G, Wang Z, Lu Y, *et al.* Underwater laser welding/cladding for high-performance repair of marine metal materials: A review[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 35(1): 1 – 19.
- [8] Parshin S, Levchenko A. Underwater hyperbaric dry welding of high strength steel arctic oil and gas pipelines[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020: 012159.
- [9] Shannon G J, Watson J, Deans W F. Investigation into the underwater laser welding of steel[J]. *Journal of Laser Applications*, 1994, 6(4): 223 – 229.
- [10] Shannon G J, McNaught W, Deans W F, *et al.* High power laser welding in hyperbaric gas and water environments[J]. *Journal of Laser Applications*, 1997, 9(3): 129 – 136.
- [11] Guo N, Xing X, Zhao H, *et al.* Effect of water depth on weld quality and welding process in underwater fiber laser welding[J]. *Materials & Design*, 2017, 115: 112 – 120.
- [12] 秦航, 蔡志海, 朱加雷, 等. TC4 钛合金水下湿法激光焊接焊缝组织与性能 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(12): 143 – 148.
- Qin Hang, Cai Zhihai, Zhu Jialei, *et al.* Microstructure and properties of welding seam of TC4 titanium alloy by underwater wet laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(12): 143 – 148.
- [13] 邢霄. 304 不锈钢水下激光焊接排水装置设计及焊接工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Xing Xiao. Design and welding technology of 304 stainless steel underwater laser welding drainage device [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [14] 李明, 张宏超, 沈中华, 等. 激光导致水击穿和等离子体形成过程的物理分析 [J]. *光子学报*, 2005(11): 12 – 16.
- Li Ming, Zhang Hongchao, Shen Zhonghua, *et al.* Physical analysis of water breakdown and plasma formation induced by laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005(11): 12 – 16.
- [15] Zhang X, Chen W, Ashida E, *et al.* Relationship between weld quality and optical emissions in underwater Nd: YAG laser welding[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41(5): 717 – 730.
- [16] Zhang X, Chen W, Ashida E, *et al.* Laser-material interaction and process sensing in underwater Nd: yttrium-aluminum-garnet laser welding[J]. *Journal of Laser Applications*, 2003, 15(4): 279 – 284.
- [17] Zhang X, Ashida E, Shono S, *et al.* Effect of shielding conditions of local dry cavity on weld quality in underwater Nd: YAG laser welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 174(1-3): 34 – 41.
- [18] Mullick S, Madhukar Y K, Roy S, *et al.* An investigation of energy loss mechanisms in water-jet assisted underwater laser cutting process using an analytical model[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 91: 62 – 75.
- [19] 秦航, 蔡志海, 张平, 等. 中碳钢水下湿法激光焊接焊缝成形行为与性能 [J]. *中国表面工程*, 2019, 32(3): 130 – 137.
- Qin Hang, Cai Zhihai, Zhang Ping, *et al.* Weld forming behavior and properties of medium carbon steel by underwater wet laser welding[J]. *China Surface Engineering*, 2019, 32(3): 130 – 137.
- [20] Sakate P M, Mullick S, Gopinath M. An investigation on physical phenomena of water-jet assisted underwater wet laser welding technique under continuous and pulsed mode operation[J]. *Optik*, 2021, 242: 167272.
- [21] Wen X, Jin G, Cui X, *et al.* Underwater wet laser cladding on 316L stainless steel: A protective material assisted method[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 814 – 824.
- [22] 冯相如. 水环境下 Cu 基合金激光沉积层的成形机理及性能调控 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- Feng Xiangru. Formation mechanism and property control of laser deposited Cu-based alloys in water environment [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [23] 吴广成, 张晓晖, 饶炯辉. 水下激光光束空间分布特性的实验研究 [J]. *激光与红外*, 2009, 39(2): 133 – 136.
- Wu Guangcheng, Zhang Xiaohui, Rao Jionghui. Experimental study on spatial distribution characteristics of underwater laser beam[J]. *Laser and Infrared*, 2009, 39(2): 133 – 136.
- [24] 李娜, 汤少华, 陆梦洁, 等. 激光波长对水体中激光诱导击穿光谱和空化气泡演化的影响 [J]. *光学学报*, 2002, 42(18): 41 – 48.
- Li Na, Tang Shaohua, Lu Mengjie, *et al.* Effect of laser wavelength on laser-induced breakdown spectra and cavitation bubble evolution in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 42(18): 41 – 48.

- [25] Long J, Eliceiri M H, Ouyang Y, *et al.* Effects of immersion depth on the dynamics of cavitation bubbles generated during ns laser ablation of submerged targets[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 137: 106334.
- [26] 鲍家定. 水层特性对水下激光划切单晶硅质量的影响研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
Bao Jiading. Study on the effect of water layer characteristics on the quality of underwater laser cutting monocrystalline silicon [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Science and Technology, 2021.
- [27] 谢明. 激光诱导空化微成形实验研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
Xie Ming. Experimental study on laser induced cavitation micro-forming [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [28] Zhao R, Liang Z, Xu R, *et al.* Dynamics of laser-induced cavitation bubble near solid boundary[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(7R): 5482.
- [29] Chen X, Xu R Q, Shen Z H, *et al.* Optical investigation of cavitation erosion by laser-induced bubble collapse[J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, 36(3): 197 – 203.
- [30] 强豪. 水环境激光空泡与金属靶材相互作用过程及机理研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
Qiang Hao. Study on the interaction process and mechanism between laser void and metal target in water environment [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [31] 蔡志海, 尤家玉, 秦航, 等. 铝青铜水下湿法激光焊接焊缝成形与力学性能 [J]. *装甲兵工程学院学报*, 2019, 33(1): 104 – 109.
Cai Zhihai, You Jiayu, Qin Hang, *et al.* Weld forming and mechanical properties of aluminum bronze by underwater wet laser welding[J]. *Journal of Armored Forces*, 2019, 33(1): 104 – 109.
- [32] Kumar V, Hussain M, Raza M S, *et al.* Fiber laser welding of thin nickel sheets in air and water medium[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2017, 42: 1765 – 1773.
- [33] Feng X, Cui X, Zheng W, *et al.* Effect of the protective materials and water on the repairing quality of nickel aluminum bronze during underwater wet laser repairing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 114: 140 – 145.
- [34] 肖镌璐. 高压干法水下激光熔覆表面修复工艺研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
Xiao Juanlu. Research on surface repair technology of high pressure dry underwater laser cladding [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [35] 邵长磊, 肖镌璐, 朱加雷, 等. 激光填丝熔覆表面修复工艺研究及压力环境验证 [J]. *北京石油化工学院学报*, 2021, 29(4): 14 – 18.
Shao Changlei, Xiao Juanlu, Zhu Jialei, *et al.* Study on surface repair technology of laser wire cladding and verification of pressure environment[J]. *Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology*, 2021, 29(4): 14 – 18.
- [36] Pang S, Hirano K, Fabbro R, *et al.* Explanation of penetration depth variation during laser welding under variable ambient pressure[J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(2): 022007.
- [37] Luo M, Hu R, Li Q, *et al.* Physical understanding of keyhole and weld pool dynamics in laser welding under different water pressures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 137: 328 – 336.
- [38] Su J, Zhang Z, Xiao M, *et al.* Effects of ambient pressure on single-pulse laser processing of austenite stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 263: 59 – 72.
- [39] Wang K, Shao C, Jiao X, *et al.* Investigation on microstructure and properties of duplex stainless steel welds by underwater laser welding with different shielding gas[J]. *Materials*, 2021, 14(17): 4774.
- [40] Wang K, Jiao X, Zhu J, *et al.* Effect of nitrogen protection on weld metal microstructure and intergranular behavior of S32101 duplex stainless steel 15 m water depth hyperbaric laser underwater welding[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022, 14(1): 1 – 12.
- [41] Luo Y, Tang X, Lu F, *et al.* Effect of subatmospheric pressure on plasma plume in fiber laser welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 215: 219 – 224.
- [42] 史俊锋. CO₂ 激光深熔焊接光致等离子体行为的数值模拟 [D]. 北京: 北京工业大学, 2001.
Shi Junfeng. Numerical simulation of photoplasma behavior in CO₂ laser deep penetration welding [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2001.
- [43] 王永贵. 侧吹气体对光致等离子体结构和屏蔽效应的影响 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
Wang Yonggui. Influence of side-blown gas on the structure and shielding effect of photoplasma [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [44] Kawahito Y, Kinoshita K, Matsumoto N, *et al.* Effect of weakly ionised plasma on penetration of stainless steel weld produced with ultra high power density fibre laser[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(8): 749 – 753.
- [45] Long J, Zhang L J, Ning J, *et al.* Dynamic behavior of plasma and molten pool of pure titanium during hyperbaric laser welding[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 115: 103686.
- [46] Long J, Zhang L J, Zhang L L, *et al.* Towards better understanding of hyperbaric fiber laser spot welding of metallic material[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 56: 372 – 381.
- [47] 孙大为. 高功率激光焊接等离子体三维重建及能量传输研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
Sun Dawei. 3D reconstruction and energy transfer of high power laser welding plasma [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [48] Qiu W, Yang L, Zhao S, *et al.* A study on plasma plume fluctu-

- ation characteristic during A304 stainless steel laser welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 33: 1 – 9.
- [49] Chida I, Mukai N, Kono W, *et al.* Development of multifunction laser welding head as maintenance technologies against stress corrosion cracking for nuclear power reactors[C]//International Conference on Nuclear Engineering, 2009: 319 – 325.
- [50] Hamada Y, Nagasawa K, Oowaki K, *et al.* Development of high reliable welding method with underwater laser welding technology for stainless steel made structures installed in underwater[C]//Japan Society of Maintenance. Annual Meeting of Japan Society of Maintenance, Tokyo, 2019: 24 – 26.
- [51] 姚杞. 不锈钢水下激光焊接研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
Yao Qi. Research on underwater laser welding of stainless steel [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [52] 李丛伟, 邵长磊, 朱加雷, 等. 304 不锈钢局部干法水下激光填充熔覆层微观组织及性能 [J]. 焊接学报, 2019, 42(8): 67 – 74.
Li Congwei, Shao Changlei, Zhu Jialei, *et al.* Microstructure and properties of 304 stainless steel localized dry process underwater laser wire cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 42(8): 67 – 74.
- [53] Di X, Ji S, Cheng F, *et al.* Effect of cooling rate on microstructure, inclusions and mechanical properties of weld metal in simulated local dry underwater welding[J]. Materials & Design, 2015, 88: 505 – 513.
- [54] 黄尊月. 水介质下激光焊接机理及关键技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
Huang Zunyue. Research on mechanism and key technology of laser welding in water medium [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [55] 谷占飞. 活性剂辅助激光焊接组织性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
Gu Zhanfei. Study on microstructure and properties of activator-assisted laser welding [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [56] Huang Z Y, Luo Z, Ao S, *et al.* Underwater laser weld bowing distortion behavior and mechanism of thin 304 stainless steel plates[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 123 – 135.
- [57] Guo N, Wu D, Wang G, *et al.* Investigation on underwater wire-feed laser deposition of 5052 aluminum alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 76: 687 – 694.
- [58] Fu Y, Guo N, Cheng Q, *et al.* In-situ formation of laser-cladded layer on Ti-6Al-4 V titanium alloy in underwater environment[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 131: 106104.
- [59] Guo N, Wu D, Yu M, *et al.* Microstructure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy prepared by underwater wire feeding laser deposition[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 73: 269 – 278.
- [60] Liu Y, Li C, Huang X F, *et al.* Investigation on solidification structure and temperature field with novel processing of synchronous powder-feeding underwater laser cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 296: 117166.
- [61] Liu C, Guo N, Cheng Q, *et al.* In situ formation of laser-cladded layer on thin-walled tube of aluminum alloy in underwater environment[J]. Materials, 2021, 14(16): 4729.
- [62] 郭宁, 王美荣, 郭伟, 等. 水下湿法自保护药芯焊丝 [J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 13 – 16.
Guo Ning, Wang Meirong, Guo Wei, *et al.* Underwater wet self-protected flux-cored wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 13 – 16.
- [63] Han Yongquan, Han Jiao, Chen Yan, *et al.* Stability of fiber laser-MIG hybrid welding of high strength aluminum alloy[J]. China Welding, 2021, 30(3): 7 – 11.
- [64] 江东远. 6061 铝合金超声波辅助激光焊接工艺研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
Jiang Dongyuan. Study on ultrasound-assisted laser welding of 6061 aluminum alloy [D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [65] 张小凡, 张建勋, 王浩, 等. 稳态磁场辅助激光焊技术研究现状与展望 [J]. 热加工工艺, 2022, 51(13): 1 – 8.
Zhang Xiaofan, Zhang Jianxun, Wang Hao, *et al.* Research status and prospect of steady state magnetic field assisted laser welding technology[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(13): 1 – 8.

第一作者: 薛龙, 教授, 博士研究生导师; 主要研究方向为水下焊接及特种机器人技术; Email: xuelong@bipt.edu.cn.

(编辑: 郑红)