

水下焊接技术的研究进展

郭 宁^{1,2}, 叶一夫², 王紫阳², 章红广², 张 欣^{1,2}, 付云龙^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(2. 哈尔滨工业大学(威海) 山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209)

摘 要: 随着海洋工程的快速发展, 水下焊接技术的研究与应用已成为海洋工程建设的关键。本文简述了水下焊接的分类及其特点, 重点分析了水下环境、焊接材料、焊接工艺对水下湿法焊接质量的影响规律, 介绍了焊接过程原位观测方法和外加辅助手段在水下湿法焊接领域的应用, 总结了送粉/送丝两种方式的水下局部干法激光焊接研究成果, 介绍了不同水深下水下干法研究进展, 分析了水下搅拌摩擦焊接领域研究成果。

关键词: 水下湿法焊接; 水下局部干法激光焊接; 水下干法焊接; 水下搅拌摩擦焊

中图分类号: TG44

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)03-0788-10

1 引言

海上石油和天然气管道、采矿平台、船舶、海滨部件、码头以及港口设备和系统的维修和维护都离不开水下焊接技术。根据排水程度不同可分为水下湿法、干法及局部干法焊接3类^[1]。由于焊前将水全部排开, 水下干法焊接质量与陆上环境基本一致。水下干法焊接质量高, 但焊接设备要求高、准备步骤复杂、焊接成本昂贵。水下局部干法是指将待焊区域水排开, 形成一个可移动的局部无水气相区, 焊接电弧在无水气相区中燃烧。与水下干法相比, 其设备简单、成本降低, 但仍需要一定的机械设备辅助机构。水下湿法焊接是指不采取任何防护措施, 焊接区域直接与水环境接触的水下焊接方法, 由于电弧在气囊内燃烧、焊接区域缺乏保护, 焊接过程稳定性差、焊接缺陷多、接头质量较差, 但由于焊接过程中不需要任何其他辅助装置, 其设备简单、成本低廉、操作灵活、通用性强, 一直以来受到国内外学者的重点关注^[2], 除了上述3种水下熔焊方法, 国内外学者在水下搅拌摩擦焊接这

种不受水深限制的固相焊接方面也开展了大量研究。本文将对上述4种水下焊接方法进行介绍。其基本特征如表1所示。

2 水环境对水下焊接影响

2.1 水下环境特征

水下环境与陆上环境存在较大的差别, 水的物理和化学性质不同于空气, 水的导热系数约为空气的20倍, 密度为空气的770倍^[3]。不同的差异导致水下焊接与陆上焊接也有着显著差异。如表2所示^[4-7]。

2.2 环境变量对水下湿法焊接的影响

由于外部环境对水下湿法焊接有着较大影响, 有学者在不同的水下环境对水下湿法焊接焊接质量和接头性能进行了研究。

哈工大Chen等人^[8]研究了水下湿法药芯焊丝电弧焊(flux-cored arc welding, FCAW)过程中流量和流向对熔滴过渡方式和熔池形状的影响。结果显示, 无论焊接方向是顺流还是逆流, 流量的增加都会降低电弧的稳定性,

表1 4种水下焊接技术对比

Table 1 Comparison of four underwater welding technologies

Parameter	Wet welding	Local dry welding	Dry welding	Friction stir welding, FSW
Applicable water depth	<60 m	<150 m	>300 m	Full water depth
Typical defect	Hydrogen induced cracking	Unstable air curtain	Hull leakage	Thick plate restriction
Engineering case	Emergency repair of ship hull	Platform node reinforcement	Norwegian subsea pipeline repair	NASA fuel tank

收稿日期: 2025-09-08

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3407700); 国家自然科学基金(52305346); 山东省自然科学基金(ZR2023QE168)

作者简介: 郭 宁, 男, 1982年生, 博士, 教授, 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001, 电话: 0631-5687901, E-mail: guon@hit.edu.cn

表2 水下焊接与陆上焊接差异

Table 2 Differences between underwater welding and onshore welding

Comparison	Onshore welding	Underwater welding	Effect mechanism of water environment
Environmental pressure/ MPa	0.1	0.1 (10 m)	Arc contraction and droplet transition are instability.
Cooling rate/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$	$10^2\text{--}10^3$	$10^4\text{--}10^5$	HAZ hardness and the proportion of martensite increase, but toughness decreases.
Hydrogen-Induced defects / $\text{mL}\cdot(100\text{ g})^{-1}$	$[\text{H}]\leq 5$	$[\text{H}]\geq 15$	Hydrogen is produced from water decomposition.
Process adaptability	Flexible in all positions	Dry welding: requires hull	Visibility restricts operation precision ^[4] .
Energy spectrum characteristic	Arc stability	Arc contraction	Energy consumption for water ionization ^[5] , bubble oscillation, and current fluctuation occur ^[6] .
Metallurgical quality	Porosity<1%	Porosity: 5%–20%	Increased molten-pool solidification rate leads to hindered bubble escape ^[7] .

增加排斥熔滴过渡和飞溅的比例。提高流量会增大焊接热耗散,导致电弧温度降低,电弧收缩,电子密度提高,熔深加大。实验显示水下湿法焊接时,水流速度不宜超过1.5 m/s。顺流方向施焊由于熔池对水流的阻挡,对电弧及熔滴起到了一定的保护作用,因此焊接过程稳定性相比逆流施焊更加稳定。

哈工大Guo等人^[9]研究了硼酸环境对水下湿法焊接的影响。结果显示,水下湿法焊接过程中的电弧稳定性随着硼酸浓度的增加而恶化。水下湿法焊接过程中存在一定程度的熄弧和短路现象,硼酸浓度越高,焊接过程中平均短路时间越长,“长时间短路”所占比例提高,导致水下湿法焊接过程中电弧稳定性变差。硼酸浓度增大会增加熔滴过渡的阻力,从而使短路过渡比例降低,表面张力过渡比例增大,而熔渣的粘度则有所降低。

3 水下湿法焊接技术研究进展

3.1 焊接材料的研究

焊条和自保护药芯焊丝是水下湿法焊接最常用的两

种材料^[10]。其中,自保护药芯焊丝由于药芯内易掺合金、焊接工艺性好、焊接接头力学性能好等优点而被广泛关注^[11–12]。且自保护药芯焊丝与焊条电弧焊相比,焊接过程无需更换焊条,可显著降低接头数目,提高焊接效率,更加适应自动化和半自动化^[13–14]。近年来,国内外研究学者针对水下焊接专用药芯焊丝展开了广泛的研究,并取得了一定的研究进展。

Lizunkova等人^[15]开发了一种双夹层填充焊丝用以保护金属液滴和焊缝免受周围水环境的影响。填充焊丝的双夹层几何形状使得焊接粉末实现分离。金属粉末和合金添加剂位于填充焊丝的芯部(在腔室内部),与形成熔渣和气体的组分分开(在腔室外部)。这确保了更好地保护金属熔滴和焊缝免受大气气体的影响,同时,通过电弧压力,合金成分更好地转移到焊接熔池中,从而实现金属焊缝的最佳合金化。双夹层焊丝结构如图1所示。

Liu等人^[16]研究了Mo、Ti和B含量对水下湿法焊接接头显微组织的影响。结果表明,Mo的加入可以抑制粗大先共析铁素体(proeutectoid ferrite, PF)的形成。但是

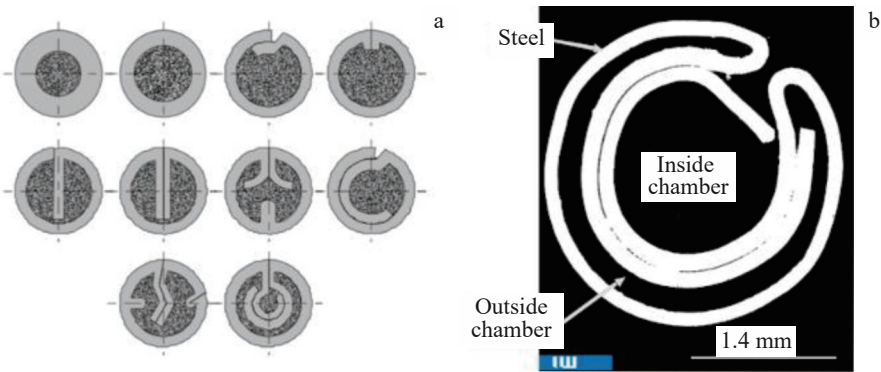


图1 双夹层焊丝的类型及结构示意图

Fig.1 Forms (a) and schematic diagram (b) of double jacket filler wire^[15]

较高的 Mo 含量(0.609wt%)导致板条状贝氏体和马氏体的形成,这对焊缝的塑性产生不利影响。Ti 和 B 的同时添加增加了针状铁素体形核。与此类似,Rowe^[17]和 Liu^[18]等人通过调整 Mn、Ti、B 和稀土金属等在金红石型焊条药皮中的配比,发现焊缝金属中的气孔和熔池合金元素氧化现象得到了抑制,并认为氢原子的运动受熔渣碱性的影响,当熔渣接近中性时焊缝气孔最少。

哈工大 Guo 等人^[19]研究了 Ni 的含量对水下焊接接头组织及力学性能的影响。Ni 有助于抑制焊缝金属柱状晶区中粗条状 PF 的形成。粗条状的 PF 分布在柱状晶晶界上,为裂纹提供通道,导致焊缝金属韧性降低。当焊缝金属中的 Ni 含量从 0 增加到 3.16wt% 时,随着 Ni 含量的增加,PF 的宽度和数量减少。随着 Ni 含量的增加,接头的抗拉强度提高,最高达 640 MPa,合金的室温和低温冲击韧性先增大后减小。当 Ni 含量在 2.04wt%~2.45wt% 时,焊缝金属中存在 30% 以上的 AF。当焊缝金属中的 Ni 含量为 2.45wt% 时,焊缝具有良好的塑性和韧性。随着焊缝金属中 Ni 含量的进一步增加,焊缝中存在马氏体和 M-A 组元的硬脆相,焊缝的力学性能变差。

哈工大 Xu 等人^[20]研究了 CaF_2 含量对水下湿法焊接稳定性和过渡形式的影响。研究发现, CaF_2 含量越大, F^- 与 H^+ 反应越剧烈,使电弧中较多的 H^+ 被消耗,电弧稳定性下降。随着 CaF_2 含量的增加,表面张力增大,表面张力过渡方式所占比例增加,而飞溅状金属熔滴过渡方式所占比例减少。

Zhang 等人^[21]设计了一款新型水下湿法中性药芯焊丝。研究显示,这种焊丝形成的 Al_2O_3 - CaO - TiO_2 - SiO_2 中性渣系留在熔池表面形成一层稳定的熔渣保护层。保护层将熔融金属与水环境机械隔离,有效延缓热量损失,并且可以起到化学冶金脱氢的效果。采用纯 Ni 带作为外金属时,获得了无气孔的焊接接头,熔敷金属的扩散氢含量为 3.61 mL/100 g,接近陆上焊接水平。

3.2 焊接工艺的研究

在水下湿法电弧焊中,焊接电流、焊接电压、送丝速度、焊接速度等工艺参数对焊接接头成形质量、焊接过程稳定性有着显著影响,不少学者对此进行了研究。

李洪亮等人^[22]利用自保护镍带药芯焊丝,对 304 不锈钢水下湿法焊接试验工艺参数进行了摸索。结果显示,焊接电流增大使熔敷金属增多,熔宽增加,熔深增加很小,余高基本保持不变。焊接电压增大,焊缝宽度呈增加趋势,同时飞溅数量明显增加,焊缝成形变差。

鲍晓明等人^[23]使用自制的水下湿法药芯焊丝以及水下自动焊接系统,通过不同焊接参数下的焊缝成形对比,研究了水下湿法焊接气孔产生的机理。结果显示,随着电流的增大,电弧温度和熔滴温度升高,熔滴过渡频率增加,产生的气孔增多。焊接速度过大,也就是焊枪移动速

度过快,功率不变时,熔池结晶速度也加快,熔池中的氢不能及时地逸出,从而产生气孔。

Zhang 等人^[24]通过正交实验,研究了焊接工艺参数对水下湿法焊缝成形和焊接飞溅的影响。结果显示,焊接飞溅量主要受焊接速度的影响。焊接速度较低时,飞溅较多,焊接电流和电弧电压的变化对飞溅数量影响不大。当焊接速度较大时,焊接电流小、电弧电压大时飞溅最大。

哈工大 Guo 等人^[25]采用脉冲送丝的方式改善水下湿法焊接熔滴过渡不稳定的问题。采用脉冲送丝方式,通过对相同频率条件下的脉冲送丝过程进行对比分析,发现在送丝速度较慢、送丝量较小的条件下,成形性和稳定性较好。脉冲送丝频率对焊缝形貌和焊接稳定性的影响大于脉冲占空比。

3.3 焊接过程检测手段

与陆上电弧焊接不同,水下湿法电弧焊存在更多的干扰因素,焊接过程的观测分析较为困难。相较陆上传统的焊接过程检测方法,众多学者结合水下实际,提出了焊接电信号、气泡声信号、镝灯背光法、X 射线透射法等检测方法。

由于电信号采集方便且提供较多有效信息,故在水下湿法焊接实验中得到了广泛应用^[26]。尤其在水下湿法焊接过程稳定性研究中基本上均采用电信号进行分析^[27]。胡家琨等人^[28]提出利用电弧电压标准差等指标来评价焊接过程稳定性,并分析了焊接工艺参数对焊接过程稳定性的影响。Mita 等人^[29]采用多元回归方程分析焊接电信号波形与电弧稳定性之间的关系,提出稳定性指数作为新的评价指标。

熟练的焊接操作人员能根据电弧产生的声音判断焊接稳定性、飞溅情况,与此类似,通过气泡声信号也可以进行焊接质量检测。这是因为气泡的产生途径之一是电弧燃烧使周围水分解成氢气和氧气,反过来气泡的破损会导致电弧波动甚至熄弧,两者相互影响存在实时相关性。李志刚等人^[30]将水声换能器和焊接枪头固定在一起平行放置,利用焊接过程中采集的气泡声信号进行水下湿法焊接质量检测。研究结果显示,气泡声信号与电弧电信号之间存在明显的实时相关性,从声压信号的变化中可以清晰地反映出电弧燃烧的稳定状态。

目前,研究熔滴过渡的方法主要有 4 种:声信号分析法、频谱分析法、电信号分析法和视觉分析法^[31]。其中,视觉分析法是检测熔滴过渡最直观的方法,它直接观察到熔滴过渡的图像。山东大学 Jia 等人^[32]利用镝灯和激光两个背景光源配合高速摄像机对水下湿法焊接进行了可视化研究,结果显示,可以较为清晰地采集到气泡和电弧形态等物理信息。但是由于电弧弧光、水下气泡扰动和水下光线折射的影响,采集到的图像关于熔滴过渡及

熔池内部流动等具体过程展现不太明显。

山东大学的Zhao等人^[33]使用高速摄像机采集到了水下湿法焊接过程中气泡和电弧动态行为并进行了模拟,采集到的图像和原理图如图2所示,将电弧气泡的一个循环周期分成3个阶段,分别为生长阶段,底部收缩阶段和分离阶段。电弧气泡在生长阶段主要是沿着水平方向进行生长,而在底部收缩阶段主要沿着竖直方向生长。周期循环的气泡对电弧的保护作用并非一成不变,周围的水也会接触电弧并冷却焊缝的边缘,使焊接过程稳定性降低,进而影响焊缝成形及性能。

由于X射线的波长短,能量高,可以穿过相对较厚的物体,而不会被吸收或散射,可以克服气泡和不均匀光线对熔滴过渡的影响,获得清晰的熔滴图像,哈工大Guo等人^[31,34]将X射线成像技术应用于水下湿法焊接的视觉检测,成功搭建了由X射线高速成像模块和电信号检测模块组成的X射线图像和电信号同步采集系统。X射线成像模块由聚焦X射线管、图像增强器和高速相机(帧速率为2000 f/s)组成。像增强器可以将X射线透射图像转换

为可见光图像,高速摄像机可以真实的实时记录熔滴过渡图像。该系统可以实时采集和分析熔滴过渡过程,原理示意图如图3所示^[35]。

基于X射线高速成像模块,哈工大郭宁等人在国际上首次公开报道了水下药芯焊丝湿法焊接的熔滴过渡特征、熔池流动行为及熔池内部的气体演变规律,同时结合电信号检测模块,系统分析和研究了水下湿法焊接过程中的传质传热过程。使用该系统Xu等人^[36]对水下药芯焊丝湿法焊接飞溅形成机理进行了表征,观察到水下湿法焊接过程中形成的3种典型飞溅模式:熔滴排斥飞溅、爆炸飞溅和熔池冲击飞溅。付云龙^[37]借助该系统,按照熔滴不同过渡行为,将水下湿法焊接基本熔滴过渡形式分为排斥过渡、短路过渡以及“潜弧过渡”。Chen等人^[38]使用X射线对水下湿法焊接电弧气泡行为对熔滴过渡影响进行研究,结果表明,熔滴与焊丝轴线之间存在较大的偏离角。分析认为是气泡膨胀速度快,对液滴产生较大的拖曳力,导致液滴摆动,出现较大偏离。

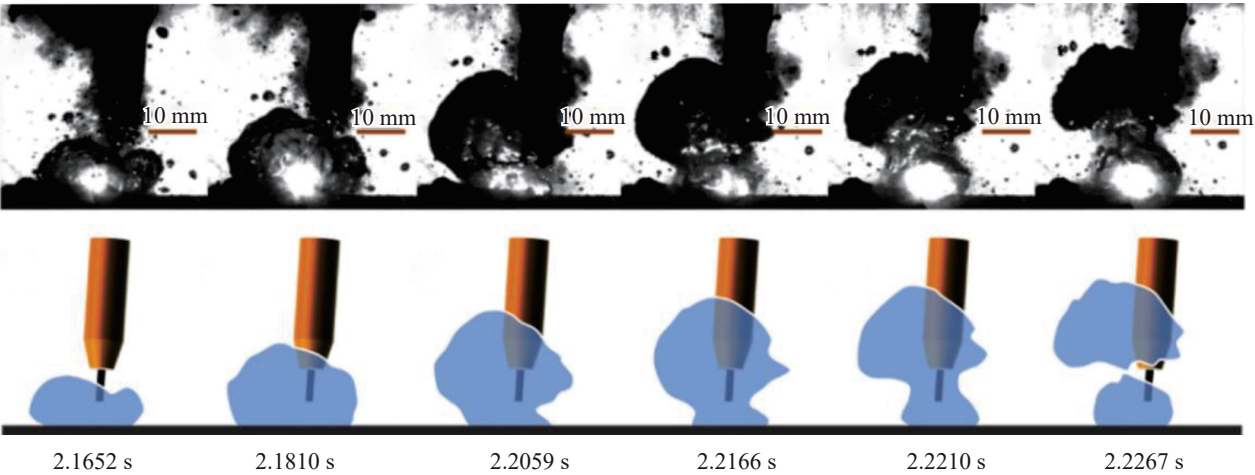


图2 水下湿法焊接过程中电弧气泡演化图

Fig.2 Evolution diagram of arc bubble in underwater wet welding^[33]

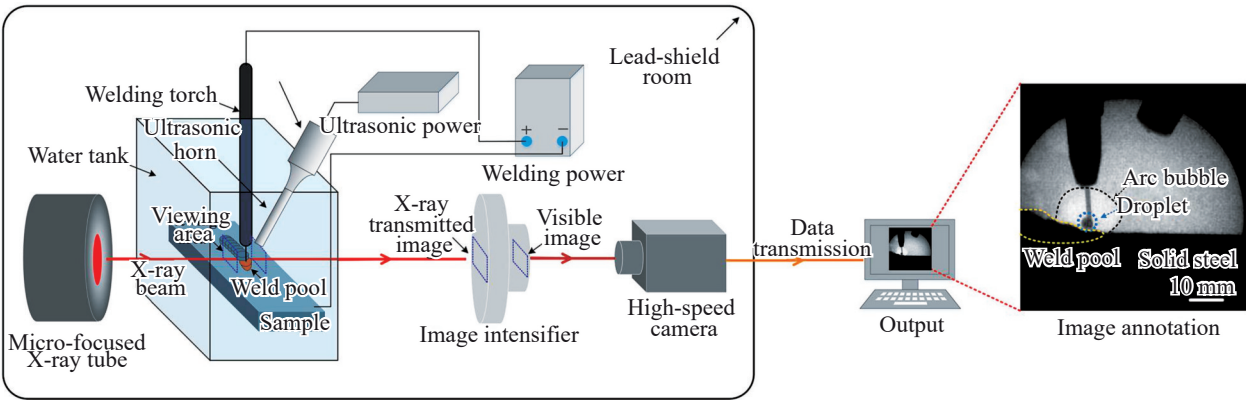


图3 X射线图像采集系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of X-ray image acquisition system^[35]

3.4 外加辅助手段的水下湿法焊接

为提高水下湿法焊接质量,不少学者结合外加磁场、感应加热、机械约束、超声控制等辅助手段进行水下湿法焊接试验,并取得了一定的研究成果。

赵焕尧^[39]研究了外加纵向磁场对水下湿法焊接的影响。研究发现,焊接电弧在纵向磁场作用下发生一定程度的旋转,增大电弧在焊接过程中的有效作用面积,随磁场强度增加,电弧旋转周期降低、半径增大,熔池也随电弧呈“旋涡状”围绕焊丝旋转。磁场作用下,熔池发生搅动使熔池内部液体金属流动,打碎了熔合线附近树枝晶,形成细小的等轴晶。

针对水下湿法焊接焊后冷却速度太快,代翔宇^[40]和胡乐亮^[41]采用感应加热的方式对焊接接头进行即时缓冷。结果显示,感应加热增加整个焊接过程的热输入,导致焊接接头熔深增加,热影响区变大。随着热输入量增大,板条马氏体及上贝氏体组织的含量减少,先共析铁素体及针状铁素体组织含量增加,扩散氢的平均含量逐渐增加,韧性呈现先升高后降低的趋势。

于明扬^[42]研究了机械约束对水下湿法电弧气泡演化行为的影响。研究发现,机械约束能提高电弧的稳定性,使电弧气泡演变为更加稳定。为进一步改善多层增材过程稳定性,于明扬在无孔机械约束装置的基础上设计了有孔机械约束装置。结果显示有孔机械约束辅助下的多层增材过程电压电流变异系数的倒数之和提升了20%,不稳定燃烧过程比例降低了67%。机械约束装置示意图如图4所示。

哈工大Chen^[43]和Wang^[44]等研究了超声对水下湿法气泡动力学、熔池内气体逸出和熔池的流动行为的影响。前者利用X射线对熔池进行了观测,结果显示:超声作用下,气泡尺寸变小,破碎频率显著提高,超声促进了气体从熔池中的逸出;后者研究发现超声对气泡施加一个额外作用力即超声辐射力,在焊接过程抑制焊接电弧气泡的上浮。超声作用下气泡相对于焊枪轴线作一定角度的运动,使焊接过程不易受到侧向气泡上升的影响,焊接过程更加稳定。

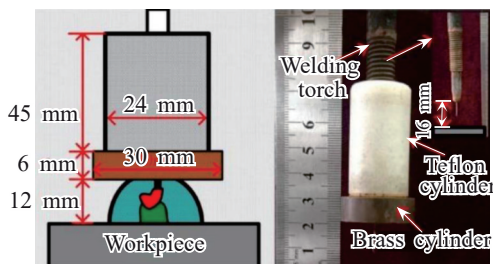


图4 机械约束装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of mechanical restraint device^[42]

4 水下局部干法激光焊接技术研究进展

4.1 局部干燥空间稳定性研究

在水下局部干法激光焊接过程中,局部干燥空间的营造需要特定的排水装置,排水装置的排水性能与气流量、喷嘴内径、排水气压、气流速度等有关。

基于此清华大学张旭东采用填丝热导焊的方法研究水下激光焊接的基本物理现象^[45],实验表明,较小的气体流速无法保证局部干燥空间的稳定性,并且随着喷嘴内径的增加,获得稳定干燥区的最小气体流速降低,但随着气体流速的增大咬边驼峰等缺陷增多。

张恒泉^[46]采用自主搭建的双层排水罩局部干法装置对3 mm厚316L入待焊区域出现未焊透缺陷,随着排水气压的增大,焊接缺陷减少,焊缝截面积增大。

姚杞^[47]采用水下局部干法激光焊接技术对1 mm厚SUS304不锈钢进行了焊接试验,重点分析了水深及保护气体流量对焊缝成形与力学性能的影响,在相同的水深下,随着保护气流量的增加,焊缝的熔宽均有一定程度的增加,并且局部干燥空间的面积也随之增大。

当前研究已建立排水参数-干燥效果的定量关系,但在动态水流适应性(如海洋湍流)和气压、流速、及水深多参数耦合作用方面存在空白。

4.2 焊接工艺研究

与陆上焊接相似,水下局部干法激光焊接工艺参数主要包括离焦量、激光功率、焊接速度、送丝速度等。各工艺参数对焊接接头成形性能,焊缝外貌焊接缺陷等都有显著影响。

为了获得高质量的水下焊缝,郭宁^[48]等通过调节焊接速度和送丝速度,研究TC4钛合金的水下激光填丝焊接工艺,对不同工艺参数下焊缝的宏观形貌,微观成形,以及微观组织和力学性能进行分析。结果表明:当焊接速度和送丝速度分别为20和60 mm/s时,可以得到成形良好、连续稳定的焊缝,此时焊缝接头的屈服强度和冲击韧性均达到最高,分别为813.42 MPa和39.07 J/cm²。

Fu等^[49]采用自主设计的双面气体保护喷嘴对TC4钛合金进行水下局部干法激光焊接,优化了热输入和离焦量,随着焊接热输入的增加,焊接区域热输入量增加从而导致焊缝氧化程度增加进而影响焊接接头的力学性能,随着离焦量的增加,熔合区宽度增加而热影响区的宽度基本不变。在最佳的工艺参数下,水下焊接接头的冲击韧性和抗拉强度达到了空气中的90%。

江苏大学朱兆剑等^[50]对Inconel 690合金进行水下局部干法激光焊接,研究了热输入和离焦量对焊接结果的影响,在最优的热输入离焦量下,水下焊接接头的常温 and 350 °C高温抗拉强度与陆上焊接接头相近,冲击韧性达到了陆上焊接接头的90%左右,而焊缝区显微硬度显著高于陆上焊接接头。

天津大学姚杞^[51]对 304 不锈钢进行不等厚板对接焊实验,结果表明激光光斑居中时获得的焊缝有效熔深和接头抗拉强度最大;激光光斑偏向厚板侧时,焊缝有效熔深和接头抗拉强度最小。不论激光光斑位置居中,偏向薄板或厚板侧,局部干法水下激光焊获得的焊缝有效熔深均小于普通激光焊,且厚板侧柱状晶区宽度大于薄板侧柱状晶区宽度。

目前水下局部干法激光焊接工艺参数研究主要集中在钛合金以及 304 不锈钢^[52-53],这主要是因为相比于陆上环境,水下环境对服役材料性能要求更高。开发更多材料进行水下局部干法焊接成为未来主要研究方向之一。

4.3 送丝式水下激光焊接

针对 304 不锈钢的水下激光焊接,哈尔滨工业大学 Guo 等^[54]尝试水环境下 304 不锈钢原位激光熔覆涂层研究,在水中原位制备了 304 不锈钢水下激光熔覆涂层的同时指出,高密度的气溶胶颗粒会降低激光功率的密度,降低焊接过程的稳定性。

北京石油化工学院赵亮^[55]等采用自主研制的水下激光填丝焊接装备,在确定的焊接参数下对 304 不锈钢进行焊接实验,对空气和水下环境中焊缝进行对比,可知水下焊缝和空气中焊缝微观组织与晶粒大小不同,水下焊缝的硬度,耐腐蚀性均高于空气中。水下焊缝性能可以满足 304 不锈钢空气环境下的焊接质量标准。

基于对钛合金的研究,哈尔滨工业大学 Fu 等^[56]利用激光沉积喷嘴对 Ti-6Al-4V 合金进行了水下送丝激光沉积实验。重点研究了沉积层几何形貌、几何特征、沉积轨迹以及显微组织显微硬度。在此基础上^[57]采用水下激光熔覆技术在 Ti-6Al-4V 基体上制备熔覆层,并对水下激光熔覆层的形成特点、金相组织、显微硬度和腐蚀行为进行

了详细的研究。通过局部干法得到的熔覆层成形质量明显高于水下湿法激光熔覆层。相比于陆上熔覆层,水下熔覆层中出现大量的片状马氏体,其显微硬度明显高于陆上。同时该学者采用了水下激光金属沉积 (underwater laser metal deposition, ULMD)喷嘴形成了稳定的局部干腔和围绕沉积层的保护气流层,得到了均匀无裂纹、无气孔的薄壁零件如图 5 所示^[58]。

4.4 送粉式水下激光焊接

水下局部干法激光焊接过程中存在焊丝成分固定,焊接角度不灵活等缺陷。东南大学 Wang^[59]等学者开发出送粉水下激光金属沉积技术,通过粉末成分的调整以改变结构的性能。通过采用激光熔覆头与专用气幕喷嘴相结合的方式,在局部干燥腔体内进行了 Ti-6Al-4V 合金的熔覆,采用优化后的工艺参数获得了无明显冶金缺陷的完全致密的 Ti-6Al-4V 零件,对比了水下和空气中激光金属沉积 Ti-6Al-4V 零件,由于水的冷却作用导致较大的热梯度和较大的冷却速度,使得 α' 马氏体提前形成并限制了 V 原子的长程扩散。

西安交通大学 Liu 等^[60]采用同步送粉水下激光增材制造 (synchronous underwater additive manufacturing, SUAM)技术在 A32 甲板钢表面制备了组织均匀,质量优良的铁基涂层,并且还采用数值模拟的方法研究了 SUAM 工作参数下的温度场变化和涂层形成过程。实验得出送粉气体流量、激光功率和送粉速率是决定 SUAM 涂层沉积和质量的关键因素。在最佳工艺参数下,涂层稀释区小于 8 μm ,腐蚀电流密度低于基体,且其显微硬度低于陆上涂层。

5 水下干法及水下搅拌摩擦焊研究进展

干法焊接通过物理隔离实现了湿法无法企及的深水高质量焊接,而搅拌摩擦焊则从冶金层面解决了湿法的

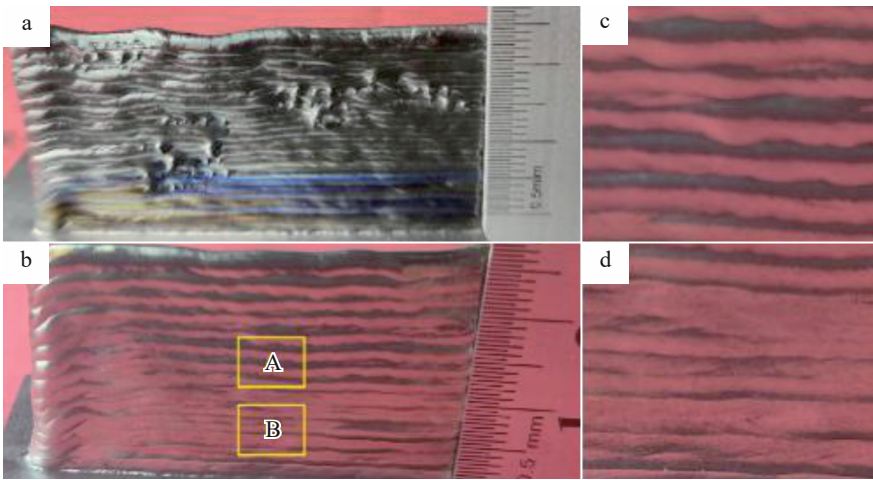


图5 增材墙体实物图

Fig.5 Appearances of ULMD parts using different underwater nozzles^[58]: (a) type 1, (b) type 2, (c) magnification of the area A marked in Fig.5b, and (d) magnification of the area B marked in Fig.5b

氢致裂纹顽疾。二者共同推动水下焊接向深水化与高可靠性前进。

5.1 水下干法焊接

水下干法焊接如图6所示,焊前将干仓内水排净,焊工在仓内进行焊接。水下干法焊接质量与陆上环境基本一致,但焊接设备要求高、准备步骤复杂、焊接成本昂贵。

Tang 等^[61]聚焦高压干法熔化极气体保护电弧焊接(gas shielded metal arc welding, GMAW)工艺的稳定性与接头性能优化,通过设计可模拟0.1~0.6 MPa压力的试验舱,结合高速摄像技术系统分析了环境压力对电弧特性和熔滴过渡的影响。结果表明:0.6 MPa时需提高保护

气流(>50 L/min)并增加电压输出;高压促进上贝氏体和碳化物析出,导致焊缝中心韧性降低。

Shi 等^[62]对比了干法与局部干法对 Q690E 高强钢焊接接头的影响,通过0.3 m水深下 GMAW 实验发现:干法接头性能优于局部干法,因后者冷却速率过快,产生更多 M-A 组元和带状组织,显著降低韧性。

北京化工大学的朱加雷等人^[63]对比分析干法焊接以及水深为5、15 m的水下湿法焊接所得焊接接头,发现3种接头机械性能均达到标准,焊缝中未出现缺陷。

海军潜艇学院陈晓强等人^[64]指出,随着水深的增加,水的机械压缩作用不断增强,电弧被压缩,电流密度升高。在1 MPa 范围内,水压每增加0.1 MPa,电弧电压平均升高2 V。

哈工大施项华^[65]研究了不同水深对焊接接头质量的影响,研究发现,随着水深的增加,焊缝成形逐渐变差,焊缝连续性降低,缺陷增多。

为了减小焊接成本,使水下干法技术成熟,目前国内外学者致力于研究轻量化干式舱,例如采用碳纤维复合材料,可大幅减小舱体重量,且将干舱部署时间压缩至4 h。

5.2 水下搅拌摩擦焊接

水下搅拌摩擦焊是唯一兼具深水适应性、航天级质量、异种材料兼容性的水下连接技术,为海洋工程与太空

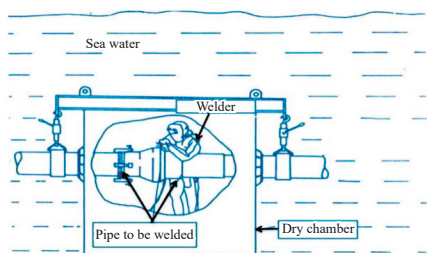


图6 水下干法焊接示意图

Fig.6 Schematic diagram of underwater dry welding^[61]

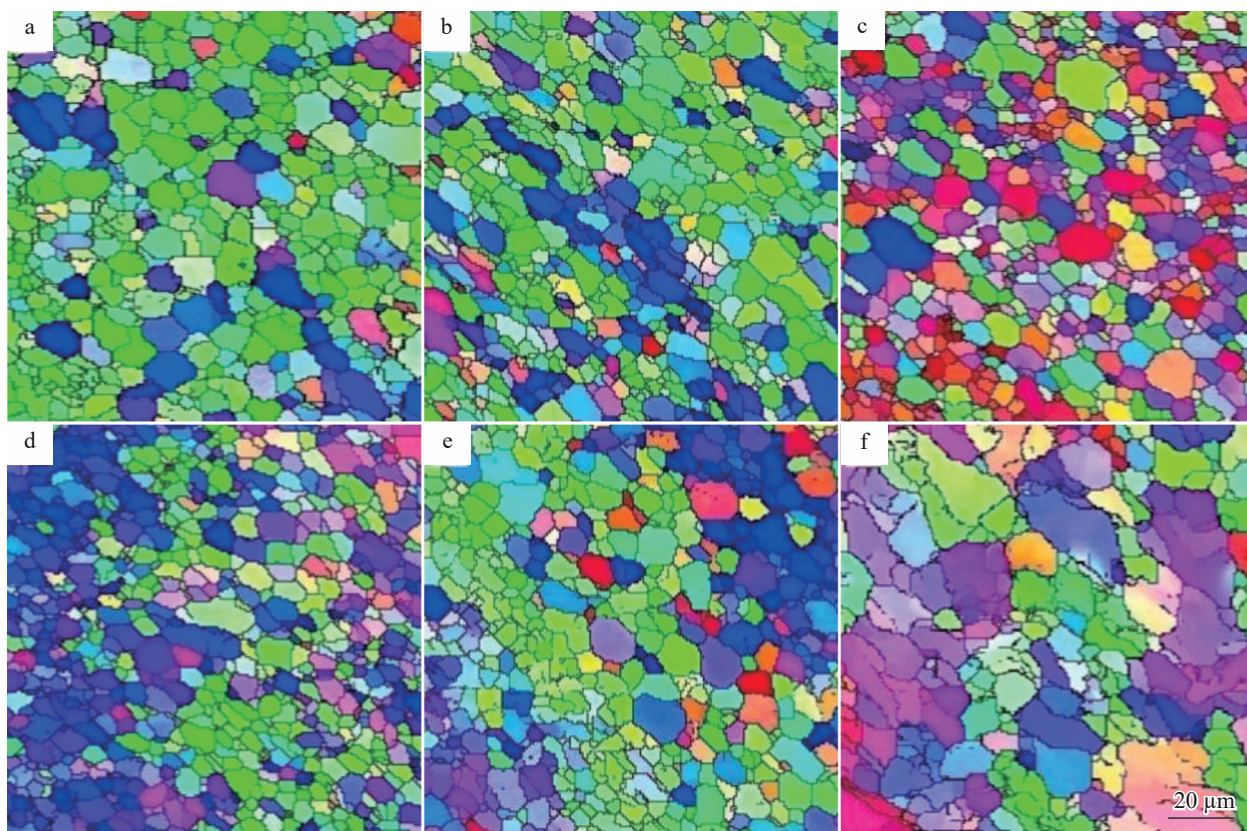


图7 不同转速水下搅拌摩擦焊焊接接头的EBSD图像

Fig.7 EBSD images of underwater friction-stir welded joints at different rotational speeds^[66]: (a) normal friction stir welded plates at 600 r/min, (b) 500 r/min, (c) 600 r/min, (d) 700 r/min, (e) 800 r/min, and (f) 900 r/min

制造提供革命性解决方案。

Shanavas^[66]通过对比空气/水下焊接,发现水下环境消除热影响区,揭示水冷使晶粒细化至 $5.1\ \mu\text{m}$ (空气焊接 $6.9\ \mu\text{m}$),如图7所示。结合微硬度分布图证明水下焊接维持92%母材硬度,为船舶薄板焊接提供新方案。

Kishta^[67]研究发现水的冷却作用对搅拌摩擦焊接参数容错率有所提升,将有效转速下限提升70%,从热循环入手,可实现工艺窗口拓宽。

Kumar 等人^[68]聚焦金属间化合物(intermetallic compounds, IMCs)抑制机制,通过水下环境将Al-Cu扩散层从 $18\ \mu\text{m}$ 压缩至 $2\ \mu\text{m}$,利用水冷缩短高温停留时间阻断 CuAl_2 脆性相生长。

王快社等人^[69]研究铝合金水下搅拌摩擦焊接的组织与性能,发现水下环境通过瞬时快冷效应显著降低加工温度,抑制晶粒长大和析出相粗化,焊后强度和硬度都提高,但延伸率普遍降低。

为了进一步提高水下搅拌摩擦焊镁合金性能,曹耿华等人^[70]引入时效热处理优化,发现时效后塑性下降但整体仍优于铸态。

与水下熔焊方法相比,水下搅拌摩擦焊可适应全水深焊接,但其与水下湿法相比成本高昂。出于实际考虑,应发挥其自身优势,发展多材料水下搅拌摩擦焊技术,解决核/航天特种需求。

6 结 语

1)水下湿法焊接电弧在电弧气囊包裹的水环境中直接燃烧,具有设备简单、成本低的核心优势(无需排水装置),但面临电弧稳定性差、气孔率高等缺陷;目前有学者从焊接材料及添加能场辅助等方面提高水下湿法焊接质量,取得了不错的成果。

2)局部干法激光焊接构建可移动无水气相区,平衡质量与经济性,仍需机械辅助定位;目前不少学者利用激光焊接的优势,提高水下原位修复质量。

3)水下干法通过高压舱完全隔离水体,实现近陆地级焊缝质量,但存在装备复杂度高、成本昂贵的瓶颈;目前学者将目光着眼于研制轻量化高压舱。

4)水下搅拌摩擦焊突破水深极限的固相连接技术,实现零氢脆、超低缺陷高质量连接,但受限于线性接头形式和成本,在水下焊接中应用不太广泛。但是未来可以在核或者航天等特种需求下发光发热。

7 展 望

立足国家经略深海战略需求,亟需突破深水极限焊接、极区低温焊接、智能化无人焊接三重技术壁垒:

1)水下湿法焊接深度革命

开发稀土氧化物纳米改性焊材;针对不同海洋环境,提升焊丝环境适应力,构建药芯焊丝成分基因库。

2)深水多场耦合监控系统

融合等离子体光谱-电弧声纹-熔池视觉多源信息;开发抗干扰强化学习算法,突破水下能见度,缺陷难以识别瓶颈。

3)水下固相焊接装备先行

研发应急维修FSW机器人;建立深水FSW热力耦合模型。

参考文献 References

- [1] Fu Yuhua(付显华). *China Offshore Oil and Gas*(中国海上油气)[J], 2000(3): 1, 8
- [2] Ma Yunhe(马云鹤), Li Zhizun(李志尊), Sun Liming(孙立明) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2018, 47(17): 10
- [3] Nieto de Castro C A, Li S F Y, Nagashima A *et al. Journal of Physical and Chemical Reference Data*[J], 1986, 15(3): 1073
- [4] Verma K, Garg H K. *International Journal on Emerging Technologies*[J], 2012, 3(2): 115
- [5] Zhang Jinli(张金利), Huang Hua(黄 华), Li Qinghui(李庆会) *et al. Technological Development of Enterprise*(企业技术开发)[J], 2010, 29(21): 44
- [6] Bao Xiaoming(鲍晓明). *Study on Underwater Wet Flux-Shielded Wire Weld Forming Quality Impact of Nickel and Manganese Element*(镍锰元素对水下湿法药芯焊丝焊缝成型质量影响研究)[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2014
- [7] Chen Ying(陈 英), Xu Wei(许 威), Ma Hongwei(马洪伟) *et al. Welded Pipe and Tube*(焊管)[J], 2014, 37(5): 29
- [8] Chen H, Guo N, Shi X H *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2018, 31: 103
- [9] Guo N, Xu C S, Du Y P *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 229: 244
- [10] Bai Tao(白 涛), Sun Jian(孙 健), Yuan Chao(袁 朝) *et al. Water Power*(水力发电)[J], 2009, 35(3): 72
- [11] Tan Yanbo(谭 彦 博). *Study On Composition and Process Optimization of Flux-Cored Wire in Slag-Covered Arc Underwater Wet Welding*(熔渣覆弧型水下湿法焊接药芯焊丝组分及工艺优化研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022
- [12] Wang Yuanliang(王元良), Chen Hui(陈 辉). *Electric Welding Machine*(电焊机)[J], 2008(7): 1
- [13] Aihara T. *Welding Research Abroad*[J], 1994, 40(8): 8
- [14] Chen Banggu(陈邦固), Xu Yuhuan(许玉环). *Welding Technology*(焊接技术)[J], 1993 (6): 3439
- [15] Lizunkova Y, Hassel T, Klotz J *et al. Oceans 2009 Europe*[C]. Hamburg: IEEE, 2009: 1
- [16] Liu D, Guo N, Xu C S *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2017, 26: 2350
- [17] Rowe M D, Liu S, Reynolds T J. *Welding Journal New York*[J], 2002, 81(8): 156
- [18] Liu S, Rowe M. *ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research*[C]. Georgia: ASM International, 2002: 15

- [19] Guo N, Liu D, Guo W *et al. Materials & Design*[J], 2015, 77: 25
- [20] Guo N, Xu C S, Du Y P *et al. Welding in the World*[J], 2019, 63: 107
- [21] Zhang X, Guo N, Ding Y C *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 24: 5669
- [22] Li Hongliang(李洪亮), Liu Duo(刘多), Yu Yifei(于谊飞) *et al. Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)* [J], 2017, 38(9): 4
- [23] Bao Xiaoming(鲍晓明), Zhang Xiaoyu(张晓宇), Guo Ning(郭宁). *Journal of Changchun University of Technology(长春工业大学学报)*[J], 2014, 35(1): 1
- [24] Guo N, Zhang X, Xu C S *et al. Metals*[J], 2019, 9(9): 951
- [25] Guo N, Huang L, Du Y P *et al. Materials*[J], 2019, 12(10): 1715
- [26] Li D, Song Y L, Ye F. *2008 AWS International Conference on Arc Welding and Filler Metals*[C]. Florida: American Welding Society, 2000: 239
- [27] Xu Changsheng(徐昌盛). *Research on Influence and Control of Metallurgical Behavior on Welding Process of Stainless Steel in Underwater Wet Flux Core Arc Welding(不锈钢水下湿法 FCAW 冶金行为对焊接过程稳定性的影响及控制研究)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022
- [28] Hu Jiakun(胡家琨), Wu Chuansong(武传松), Jia Chuanbao(贾传宝). *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2013, 34(5): 99
- [29] Mita T, Sakabe A, Yokoo T. *Welding International*[J], 1988, 2(2): 152
- [30] Li Zhigang(李志刚), Huang Wei(黄卫), Xu Xiang(徐翔) *et al. Hot Working Technology(热加工工艺)*[J], 2021, 50(21): 129
- [31] Guo N, Wang M R, Du Y P *et al. Materials Letters*[J], 2015, 144: 90
- [32] Yang Q Y, Han Y F, Jia C B *et al. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*[J], 2020, 142(4): 041401
- [33] Zhao B, Chen J, Wu C S *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 59: 167
- [34] Xu C S, Guo N, Zhang X *et al. Materials & Design*[J], 2019, 179: 107899
- [35] Chen H, Guo N, Zhang Z H *et al. Materials Letters*[J], 2020, 270: 127692
- [36] Guo N, Xu C S, Guo W *et al. Materials & Design*[J], 2015, 85: 156
- [37] Fu Yunlong(付云龙). *Research on Metal Transfer Behavior in Underwater Flux-Cored Wire Wet Welding(水下药芯焊丝湿法焊接熔滴过渡行为研究)* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018
- [38] Chen H, Guo N, Huang L *et al. Materials & Design*[J], 2019, 170: 107696
- [39] Zhao Huanyao(赵焕尧). *Research on Process and Mechanism of 304L Stainless Steel Underwater Wet Welding Process and Mechanism(304L 不锈钢纵向磁场辅助水下湿法焊接工艺及机理研究)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020
- [40] Dai Xiangyu(代翔宇). *Research on Welding Procedure of Induction Heating-Assisted Wet Welding of Q345 Steel(Q345 钢感应加热辅助湿法焊接工艺的研究)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015
- [41] Hu Leliang(胡乐亮). *Research on Welding Procedure of Underwater-Wet Welding Technology With Trailing Medium Frequency Induction Heating(外加中频热场辅助水下湿法焊接工艺研究)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014
- [42] Yu Mingyang(于明扬). *Research on Mechanical Constraint Assisted Underwater Wet Arc Additive Repair Process(机械约束辅助水下湿法电弧增材修复工艺研究)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022
- [43] Chen H, Guo N, Xu K X *et al. Materials & Design*[J], 2020, 188: 108482
- [44] Wang J F, Sun Q J, Teng J *et al. Welding Journal*[J], 2019, 98(5): 150
- [45] Zhang Xudong(张旭东), Chen Wuzhu(陈武柱), Lu Tianrongci(芦田荣次) *et al. Applied Laser(应用激光)*[J], 2002(3): 309
- [46] Zhang Hengquan(张恒泉), Zhou Xiaohui(周晓辉), Wei Lianfeng(魏连峰) *et al. Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2023, 50(12): 58
- [47] Yao Qi(姚杞), Luo Zhen(罗震), Li Yang(李洋) *et al. Journal of Shanghai Jiaotong University(上海交通大学学报)*[J], 2015, 49(3): 333
- [48] Guo Ning(郭宁), Cheng Qi(成奇), Fu Yunlong(付云龙) *et al. Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)*[J], 2020, 56(6): 118
- [49] Fu Y L, Guo N, Zhu B H *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2020, 275: 116372
- [50] Zhu Zhaojian(朱兆剑), Han Ke(韩柯), Li Hongliang(李洪亮) *et al. Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2023, 50(16): 67
- [51] Yao Qi(姚杞). *Study on Underwater Laser Welding of Stainless Steel(不锈钢水下激光焊接研究)* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017
- [52] Lin Junhui(林俊辉), Dan Zhenhua(谈振华), Lu Jiafei(陆嘉飞) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2020, 49(3): 1090
- [53] Liu Feiyang(刘飞洋), Li Tianke(李田科), Wang Ruixin(王睿鑫) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2025, 54(3): 791
- [54] Fu Y L, Guo N, Zhou C *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2021, 289: 116949
- [55] Zhao Liang(赵亮), Zhu Jialei(朱加雷), Zhao Zhibo(赵志博) *et al. Journal of Netshape Forming Engineering(精密成形工程)*[J], 2024, 16(1): 105
- [56] Fu Y L, Guo N, Zhou L *et al. Materials & Design*[J], 2020, 186: 108284
- [57] Fu Y L, Guo N, Cheng Q *et al. Optics and Lasers in Engineering*[J], 2020, 131: 106104
- [58] Fu Y L, Guo N, Wang G H *et al. Materials & Design*[J], 2021, 197: 109196
- [59] Wang Z D, Sun G F, Lu Y *et al. Surface and Coatings*

- Technology[J], 2021, 408: 126778
- [60] Liu Y, Lou L Y, Liu K C *et al.* *Nonferrous Metals Engineering*[J], 2024(12): 1
- [61] Tang D Y, Niu H L, Xue L *et al.* *Proceedings of the 2017 7th International Conference on Manufacturing Science and Engineering*[C]. Sarawak: Atlantis Press, 2017
- [62] Shi Y H, Sun K, Cui S *et al.* *Materials*[J], 2018, 11(1): 167
- [63] Zhu Jialei(朱加雷), Jiao Xiangdong(焦向东), Zhou Canfeng(周灿丰). *Journal of Shanghai Jiaotong University*(上海交通大学学报)[J], 2010, 44(S1): 81
- [64] Chen Xiaoqiang(陈晓强), Du Jingbin(都景彬), Du Yongpeng(杜永鹏) *et al.* *Welding Technology*(焊接技术)[J], 2021, 50(5): 39
- [65] Shi Xianghua(施项华). *Research on Influence of Water Depth on Welding Process and Quality of Underwater Wet Welding*(水深对水下湿法焊接过程及质量的影响研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020
- [66] Shanavas S, Dhas R E J, Murugan N *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2018, 95(9–12): 4535
- [67] Kishta E E, Darras B. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*[J], 2016, 230(3): 458
- [68] Kumar R K, Achutha P K. *Materials and Design*[J], 2014, 64: 74
- [69] Wang Kuaishe(王快社), Wu Nan(吴楠), Wang Wen(王文) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(9): 1949
- [70] Cao Genghua(曹耿华), Liu Yixiong(刘一雄), Zhang Datong(张大童) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(10): 3179

Research Progress of Underwater Welding Technology

Guo Ning^{1,2}, Ye Yifu², Wang Ziyang², Zhang Hongguang², Zhang Xin^{1,2}, Fu Yunlong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

Abstract: With the rapid development of marine engineering, the research and application of underwater welding technology has become the key to marine engineering construction. In this review, the classification and characteristics of underwater welding were briefly described. The influence of underwater environment, welding materials, and welding process on the quality of underwater wet welding was analyzed. The application of in-situ observation method and external auxiliary means in the field of underwater wet welding was introduced. The research results of underwater local dry-laser welding with powder feeding/wire feeding were summarized. The research progress of underwater dry method under different water depths was introduced. The research results in the field of underwater friction-stir welding were analyzed.

Key words: underwater wet welding; underwater local dry-laser welding; underwater dry welding; underwater friction-stir welding

Corresponding author: Guo Ning, Ph.D., Professor, State key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-631-5687901, E-mail: guon@hit.edu.cn