

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.001

水下焊接过程实时监测研究现状及发展

蒋凡, 张雨琛, 刘元, 张国凯, 雷彭博, 陈树君

(北京工业大学 汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心, 北京 100124)

摘要:随着海洋能源开发和深海工程建设需求的不断增加,水下焊接技术在保障能源供应和结构修复中起着至关重要的作用。水下环境的复杂性和极端条件会影响焊接质量的稳定性和可靠性。因此,开发焊接过程的实时监测技术就显得尤为重要。针对水下焊接环境复杂、焊接质量监测实时性要求高的特点,系统分析水下环境对焊接过程的影响,探讨不同水下焊接过程信息的差异。通过梳理电信号监测、电弧监测和熔滴行为监测等核心技术手段,揭示技术的研究重点和难点,并提出针对复杂水下环境的多源信息融合和智能化缺陷识别方法的研究思路,为未来水下焊接过程的实时监测和焊接质量的保障提供新的思考与方向。

关键词:水下焊接;过程监测;缺陷识别;智能化

中图分类号:TG444 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)04-0001-08

Research Status and Development Trends of Real-time Monitoring in Underwater Welding Process

JIANG Fan, ZHANG Yuchen, LIU Yuan, ZHANG Guokai, LEI Pengbo, CHEN Shujun

(Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Automotive Components Affiliated with Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Although underwater welding technology plays a crucial role in ensuring energy supply and structural repair in the increasing demand for ocean energy development and deep-sea engineering, the complexity and extreme conditions of underwater environments may affect the stability and reliability of welding quality, which signifies the great importance of real-time monitoring technology for welding process. This article, with the focus on the complex underwater welding environment and the high real-time requirements for welding quality monitoring, systematically analyzes the impact of underwater environment on the welding process and explores the differences in process information between different underwater welding methods. By sorting out core technologies such as electrical signal monitoring, arc monitoring and droplet behavior monitoring, the research emphasis and difficulties of existing technologies are revealed, and a research idea for multi-source information fusion and intelligent defect recognition methods for complex underwater environments is proposed, providing novel ideas and directions for real-time monitoring and welding quality assurance of underwater welding processes in the future.

Keywords: underwater welding; process monitoring; defect recognition; intelligent

0 引言

我国是全球最大的能源消费国之一,随着能源需求的持续增长,海洋油气资源的丰富性为保障国家能源安全和实现可持续发展提供了重要支撑。面对陆地油气资源逐渐枯竭的严峻挑战,我国正在积极推动能源开发由陆地向海洋转型,并加快海洋油气资源的勘探与开发步伐。水下焊接

作为海洋工程建设与维护的重要支撑技术,广泛应用于采油平台、输油管道及海底仓库等大型海洋结构物的组装、维护与修复,这是保障海洋工程安全运行的关键环节^[1]。根据热源种类,水下焊接可分为激光焊、爆炸焊、摩擦焊和电弧焊等。其中,电弧焊因具有操作性好、适应能力强等优点被广泛采用^[2],是水下焊接应用最广的焊接工艺^[3]。

相较于陆上焊接,水下焊接需在高压、低温、

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3407701)

第一作者简介:蒋凡(1987—),男,福建武夷山人,教授,博士生导师,研究方向为等离子弧焊接与增材制造。国家自然科学基金优秀青年科学基金获得者。承担国家重点研发计划课题、国防基础科研重点项目课题、国家自然科学基金、北京市自然科学基金项目等科研任务,获机械工业科学技术奖技术发明二等奖,兼任中国电工技术学会电焊技术专委会副秘书长、汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心副主任、中国机械工程学会焊接分会青年常委。jiangfan@bjut.edu.cn。

能见度低的潮湿、复杂环境下完成,焊接质量更易受到环境影响,存在焊接缺陷风险更大的问题。因此,如何在水下焊接过程中进行有效实时监测,保证焊接质量和提高焊接稳定性,已成为当前水下焊接研究的重要方向。电弧焊接涉及复杂的物理变化过程^[4],通过电弧产生高温,将金属熔化形成熔池来完成焊接材料的填充和母材的连接。电弧是提供热量的主要热源,熔池是形成焊缝的关键基础。本文从电信号变化、电弧特性以及熔滴行为等多个维度进行调研,综合分析水下焊接过程中复杂物理变化的多维信息感知,并对未来水下焊接过程中的基于多维信息感知的缺陷识别提出展望。

1 水下焊接方法与工艺特点

焊接是一种高度复杂的工艺过程,热输入、材料特性、工艺参数等因素的变化直接影响焊缝的质量,而水下环境的特殊性则进一步加剧了这一过程的复杂性。水压、温度、溶解氢等因素不仅对焊接过程的稳定性和焊缝的成形产生深远影响,还可能引发气孔、氢脆等典型焊接缺陷,使焊接质量的可预见性和可靠性大大降低。本节将从水下焊接的常见方法出发,系统探讨水下焊接环境对过程监测的影响,揭示这些因素是如何影响焊接质量的。

水下电弧焊主要包括湿法焊接、局部干法焊接和干法焊接^[5]。湿法焊接是完全在水下环境中进行焊接的技术,焊接区域与周围水体直接接触,电弧的形成、燃烧也在水中完成^[6],无任何机械屏障。局部干法焊接则是利用专门的微型机械屏障,如焊接罩或焊接舱,在焊接区域建立局部隔水环境进行操作的焊接技术,减少了水体对焊接过程的干扰,使电弧的形成与燃烧得以在较少水分干扰的条件下进行。相较于湿法水下焊接,这种技术有效降低了水体对电弧稳定性的影响,提高了焊接过程的可控性,进而改善了焊缝的成形质量。干法焊接是通过气室在焊接区域建立完全干燥环境下进行操作的焊接技术,能有效消除了水体对焊接过程的干扰。根据气室内部气压的不同,干法焊接可分为常压干法焊接和高压干法焊接,这两者均利用专门设计的焊接舱或压力舱,将焊接部件与周围水体彻底隔离,并通过控制舱内的气压和气体成分,为电弧燃烧提供接近陆地的稳定环境。该方法由于降低了水的有害影响^[7],极大地提高了焊接质量,是水下焊接中焊接质量

最优技术之一^[8]。

水下焊接环境对焊接过程的监测具有重要影响,不同的焊接方法在过程监测中面临不同的挑战。湿法焊接由于水的折射和散射作用^[9],焊接区域的光学信号衰减迅速,导致焊接过程的观察变得异常困难。水中的气泡和熔池的动态变化会周期性地影响光的传播路径,引起光学反射的波动,进一步降低可视化观察的清晰度^[10],加大了焊接过程监测的难度。局部干法焊接虽然减少了水体干扰,提高了电弧稳定性,但由于焊接过程中仍会产生大量烟尘和金属蒸气,局部隔水环境内的可见度依然受限,在一定程度上影响了焊接过程的实时监测。在高压干法焊接的监测过程中,设备则需承受较高的环境压力,因此对监测系统的耐压性能和密封性均提出了更严格的要求,增加了设备的复杂性与维护成本。

湿法焊接由于焊接区域直接暴露在水环境中,水体干扰导致焊接电弧稳定性较差,焊缝易出现气孔和氢致延迟裂纹等缺陷,难以保证理想的焊接成型质量。氢的扩散及其引发的裂纹是湿法焊接中的主要挑战之一^[11]。在湿法焊接过程中,水蒸气会被高温分解为氢(H)和氧(O)。氢在熔池形成中以自由态进入焊缝,并逐渐聚集形成氢致白点^[12]。水下焊接氢的扩散量通常是陆上酸性焊条焊接的数倍。研究表明环境湿度对熔敷金属的扩散氢含量具有显著影响,空气中水蒸气分压(即绝对湿度)越大,熔敷金属中的扩散氢含量越高^[13]。因此,富氢环境对水下焊接的焊缝金属的冶金特性以及接头的力学性能都会产生极大的负面影响。此外,水的高导热性使焊接区域的热量无法像空气中那样得到有效保留,从而导致焊缝的冷却速度大幅增加。这种快速的冷却不仅可能导致焊缝中的金属组织发生不良转变,还可能生成高硬度的马氏体和贝氏体等组织^[14],进而导致焊缝脆性增加,容易发生裂纹和其他缺陷。同时,局部干法与高压干法焊接均面临复杂的环境压力影响,随水深增加而升高,会导致焊接电弧形态会发生变化,电弧稳定性降低,从而对焊后焊缝质量产生不利影响。因此,水下焊接环境优劣不仅影响焊接过程的可监测性,还影响焊缝的成形质量与性能。

2 水下焊接过程的实时监测

水下焊接过程较复杂,通过实时监测焊接过程信息,可以提供缺陷反馈并预测缺陷的位置和

类型,从而对焊接工艺进行优化^[15]。图1展示了水下焊接过程中产生的信息及其监测方式,主要监测内容可分为电信号、电弧、熔滴,而具体监测对象为电流电压,电弧形态,熔滴过渡等。鉴于水下焊接过程中环境因素对焊接质量的显著影响,如可见度差、高氢含量和复杂的热传导条件,传统的质量控制方法主要侧重于事后检测,往往难以满足实时、高精度的监测需求。因此,过程实时监测在水下焊接中的应用显得尤为重要。

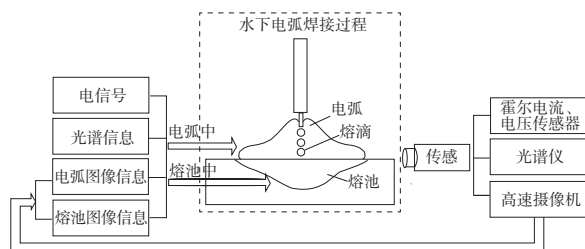


图1 焊接过程中信息及监测方式

2.1 电信号监测

在电弧焊接过程中,电信号因其便于采集且包含丰富的时域与频域信息,被认为是弧焊质量监测和过程控制方面的重要依据,其中电流和电压的动态变化直接反映了电弧稳定性、焊接热输入等关键过程参数,并与熔滴过渡、焊接缺陷等紧密相关^[16]。通过实时监测电流与电压的变化规律,可有效识别焊接过程中的异常状态,从而优化焊接参数,提高焊接质量。

在水下湿法焊接过程中,电信号受气泡扰动影响显著,表现出强烈的非平稳性和随机性。JIA等^[17]对比分析了陆上和水下湿法焊接的电信号波动情况,发现水下焊接因气泡的周期性生成、破裂对电弧行为的影响,使电信号波动更加剧烈,焊接稳定性降低,如图2所示。此外,黄晋等^[18]研究了水下湿法焊接与常压空气焊接的电弧静特性。结果表明:在相同电压下,水下湿法焊接的电流更大,说明水环境对电弧特性的影响更大。

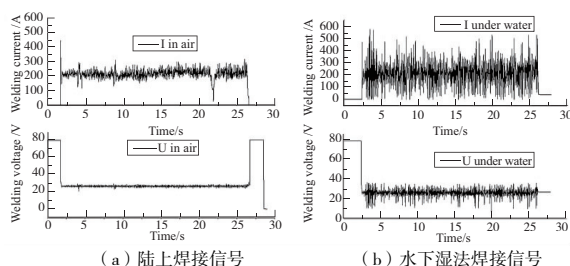


图2 不同环境的电信号

相比之下,水下干法焊接虽然避免了气泡干扰,但高压环境对电弧稳定性及焊接质量同样具有重要影响,而电信号的稳定性直接反映了电弧的稳定程度。李志辉^[19]研究了0~40m水深范围内干法脉冲焊接的电信号特性,提出了一套综合定量评价电信号稳定性的指标体系。研究表明,随着水深增加,电弧的稳定性逐渐降低。黄晓涛等^[20]提出电信号稳定系数 δ 可用于评估焊接过程的稳定性。实验结果表明:水深增加可导致 δ 值下降,表明电弧波动增强,焊接过程更易出现不稳定现象。

整体而言,水下焊接的电信号受环境因素影响显著,湿法焊接主要受气泡扰动影响,干法焊接则受到高压环境作用,导致电信号呈现出不同程度的非平稳性和随机性,波动剧烈且信噪比显著下降。这些劣势对水下焊接电信号的实时监测和分析提出了更高要求,因此,必须综合考虑气泡与水深压力等的多重影响。为了提高电信号稳定性分析的精度和可靠性,需要进一步优化传感技术,发展适应高压环境的信号采集系统,加强信号处理算法的鲁棒性,提升复杂环境下焊接质量的监测能力,并为焊接过程的优化控制提供更加精准的数据支持。

2.2 电弧监测

作为焊接过程中能量传输的核心载体,焊接电弧不仅是焊接过程的重要驱动因素,还蕴含着大量反映过程稳定性和质量的关键信息,如温度分布、化学成分和形态特征等。实时感知和分析这些信息,有助于优化焊接参数并提升焊缝质量。然而,由于焊接电弧具有超高温度、大量电磁干扰及复杂的热物性耦合变化,电弧信息的获取面临极大的挑战。传统方法在精度和鲁棒性方面常受到限制,为此,研究者们转向最具代表性的光谱信号和图像信号。本节将从光谱和图像两种信息,对电弧监测展开描述。

1) 光谱诊断

在焊接过程中,电弧等离子体的成分和温度对焊接的稳定性和质量至关重要^[21]。电弧等离子体由高能量的带电粒子和中性粒子组成,其特性直接影响能量传递、热输入以及焊接材料的相互作用。光谱信号作为电弧光分解后形成的一系列不同波长的谱线,与等离子体的温度、成分等物理特性密切相关。在众多反映焊接过程的信号源中,光谱信号贯穿焊接电弧的引弧、燃烧和熄弧全过程,能够实时反映焊接环境和焊缝质量的动态变化,有

助于实现焊接过程缺陷的有效检测,提取如电弧气氛状态、气孔形成倾向和熔滴过渡形式等关键参数,为焊接缺陷检测和工艺优化提供重要依据^[22]。

电弧等离子体的温度是决定焊接质量的关键因素之一,与焊接熔池的形成和冷却速度密切相关。光谱诊断法可用于测量温度分布,从而分析焊接过程的稳定性。杨乾铭^[23]通过光谱诊断对水下湿法焊接和水下干法焊接电弧温度进行了对比分析,发现湿法电弧温度低于干法电弧温度,且随水深逐步增加,两种方法电弧温度均逐渐升高;而 SCHMIDT 等^[24]的研究表明,环境压力增加会导致电弧温度下降。这些结果之间的矛盾促使赵华夏等^[25]进一步对高压 TIG 焊接电弧温度展开研究,实验证明了 TIG 焊接电弧温度随着环境压力的增大呈现指数下降的趋势,如图 3 所示。其中在 0.6 MPa 环境压力下,电弧温度出现剧烈波动,如图 4 所示,这表明此压力环境下电弧稳定性显著下降。

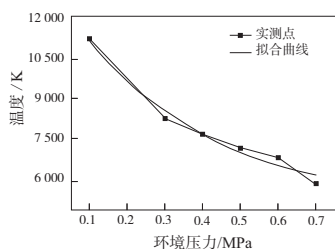


图 3 高压干法焊接不同压力环境焊接电弧温度变化曲线

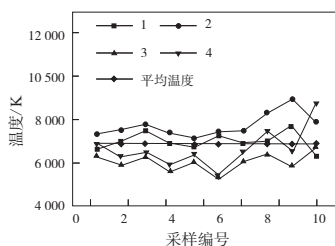


图 4 高压干法焊接 0.6 MPa 压力环境电弧温度统计曲线

焊接电弧等离子体的成分是其内部物理化学过程的直接体现,决定了热输入和金属蒸汽的形成,进而影响焊接过程的稳定性和焊接质量。在水下焊接中,等离子体成分的变化对焊接过程的稳定性和焊缝质量有显著影响。通过光谱诊断对空气和水下 FCAW 实验的光谱信号进行了对比分析,发现两者在 370~840 nm 范围内的光谱信号高度相似,峰值(除 656.279 3 nm 外)及趋势基本一致,寻峰结果相似度超过 90%。这表明空气和水下电弧等离子体中存在几乎相同的光谱辐射

和元素激发。然而,在水下光谱曲线 656.279 3 nm 处出现了独特的 H 原子跃迁峰如图 5 所示,表明水下湿式 FCAW 电弧等离子体中包含 H 元素,而空气中则不含此元素。结合光谱诊断方法进一步分析了水下湿法焊接电弧等离子体的成分,考虑了 CO、H、C、O、Fe 等粒子,利用 Saha 方程、电荷准中性和原子守恒方程计算了各粒子数的密度随温度变化的规律。结果显示,水下湿法焊接等离子体以单原子结构粒子为主,多原子粒子仅占少量。这些研究为深入理解水下焊接电弧的稳定性和提高焊接质量提供了重要参考依据。

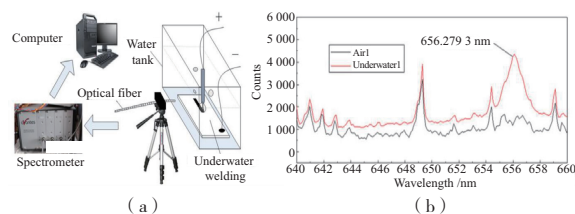


图 5 局部干法焊接光谱信息监测设备及空气和水下电弧等离子体光谱辐射的对比

2) 电弧形貌监测

电弧形貌是焊接过程稳定与否和焊接质量好坏的直接影响因素。稳定的电弧能够保证焊丝均匀熔化、热输入稳定,从而确保焊接质量。当电弧发生失稳时通常会导致焊丝熔化效率的降低甚至熔化困难,进而引发飞溅现象的增加,造成热输入不均匀^[26],甚至引发气孔、夹渣和未焊透等缺陷,降低焊接接头的力学性能和耐用性。因此,精确监测电弧形态的变化对于维持焊接过程的稳定性和提升焊接质量至关重要。

在水下湿法焊接过程中,电弧直接暴露在水中,由于焊接时高温作用使水分蒸发产生大量气泡,这些气泡在电弧周围的聚集、运动和破裂会对电弧的稳定性产生显著影响。气泡的不稳定演化会引起电弧阴极漂移,使电弧偏离预定路径,导致电弧波动增大。尤其是气泡的大小分布不均,会使电弧的强度和热输入发生变化,从而影响熔池的形成,进而影响焊接接头的质量。此外,气泡内部的气体成分不同于空气,这也影响了电弧的形态和能量传输。XING 等^[27]的研究表明,气泡的存在会限制电弧的形貌,使电弧主要集中在熔滴底部,随着液滴体积的增加,电弧温度和电弧等离子体的速度呈下降趋势,导致金属转移周期延长,熔滴增大如图 6 所示。这种现象进一步影响了工件的热通量分布,使得焊接过程的稳定性下降,增加了发生焊

接缺陷的风险。因此,在湿法焊接中,实时监测电弧形貌,分析气泡对电弧的影响,并采取有效的气泡控制措施,是提升焊接质量的重要手段。

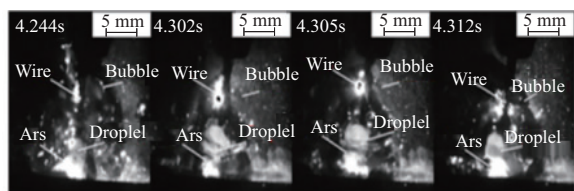


图6 水下湿法焊接金属转移过程中的图像

相比湿法焊接,水下干法焊接在高压密闭气室内进行,避免了水与电弧的直接接触,消除了气泡的影响。然而,随着焊接深度的增加,环境压力升高,电弧的形态和行为发生显著变化。WU等^[28]根据电弧监测设备(图7)发现,在高压环境下,电弧逐渐变得更亮并缩小,如图8所示,电弧的燃烧更加剧烈,但也表现出不稳定性,电弧形貌变得更加集中并伴随波动,影响熔池的均匀性。贾滨阳^[29]的研究进一步表明,随着环境压力的升高,电弧从钟罩形向锥形转变的临界电流逐渐增大,电弧弧长缩短,稳定性逐渐下降。在相同焊接电流下,随着压力增大,电弧阴极区的宽度逐渐变窄,电弧形貌由钟罩形逐渐变为椭球形。这种形貌变化导致热输入不均匀,增加了焊接缺陷的风险。此外,HUANG等^[30]的研究进一步表明,高压环境下,电弧的轴向和径向尺寸逐渐收缩如图9所示,尤其是电弧长度显著减小,增加了短路过渡的频率,进一步影响焊接过程的稳定性。因此,在水下干法焊接中,需要针对高压环境对电弧行为的影响,优化焊接参数,并采用适当的压力补偿技术,以确保电弧的稳定性和焊接质量。

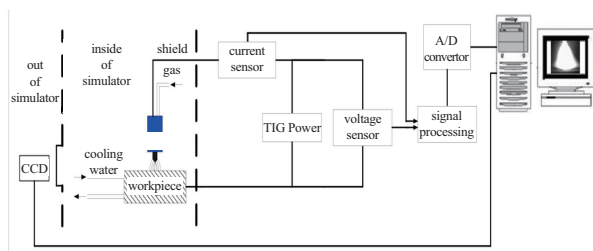


图7 高压干法焊接电弧监测设备

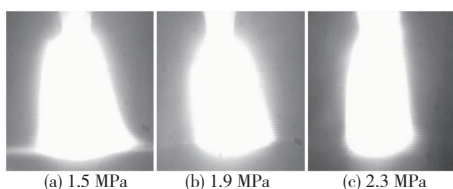


图8 高压干法焊接不同环境压力下电弧形貌

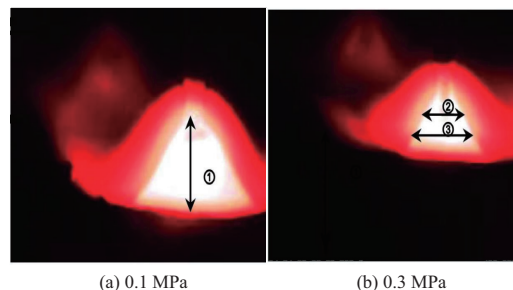


图9 高压干法焊接不同环境压力下电弧行为

水下焊接环境中的电弧形貌受到多种因素的影响。湿法焊接中,气泡的产生和运动是影响电弧稳定性的主要因素,而干法焊接则主要受到环境压力变化的影响。与陆上焊接相比,水下焊接由于气泡和高压的双重作用,使得电弧行为更为复杂,焊接过程更难控制。因此,在水下焊接过程中,必须充分考虑这些特殊因素的影响,结合电弧形貌监测技术,优化焊接参数,以确保焊接过程的稳定性,提高焊接质量。

2.3 熔滴行为监测

熔滴作为熔池金属补充的主要来源,其形成与转移直接影响熔池的稳定性、焊缝成形及焊接接头的性能。因此,对熔滴行为的实时监测,可以为焊接质量的在线评估与优化控制提供重要数据支持。

在水下湿法焊接过程中,熔滴的形成和脱落受到气泡动力学的影响较为显著。HAN等^[31]的研究表明,湿法焊接过程中主要存在3种熔滴过渡模式:间接排斥过渡、直接排斥过渡、表面张力过渡。气泡的向上运动会在熔滴上沿漂浮气泡的方向产生气流阻力,这种气流作用使得湿法焊接中排斥金属转移的比例高于陆上焊接,导致熔滴脱离轨迹的不稳定性增加。此外,XU等^[32]观察到,熔滴中的气体形成与排放现象贯穿整个熔滴的形成过程,并持续至其进入熔池。这主要由熔滴内溶解的氢气以及熔滴表面温度分布的不均匀性引起。在水下焊接中,熔滴因氢气溶解和温度梯度的作用通常呈现中空球体结构,且壁厚不均,如图10所示。这种非均匀结构显著影响了金属转移方式、电弧稳定性及焊接飞溅行为。而在空气焊接中,熔滴多为实心球体,仅在中心有一小孔。熔滴内气体的析出与释放过程的反复进行,直至熔滴凝固,这不仅加剧了水下焊接过程的不稳定性,还易导致气孔的产生,进而影响焊接质量。

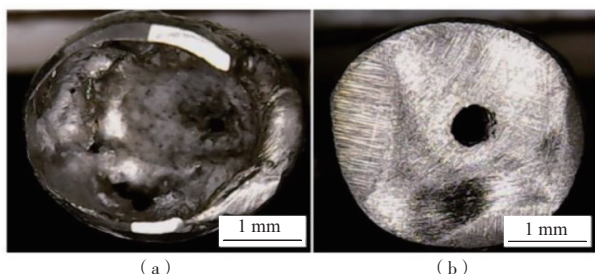


图 10 水下湿法焊接凝固熔滴剖面图

在水下干法焊接中,熔滴的转移受环境压力的影响尤为明显。LIAO 等^[33]指出在水下局部干式 MIG 焊接 (local dry underwater MIG welding, LDU-MIG) 中,随着气体压力的增加实现液滴转移过程将变得更加困难,液滴需要更大的重力才能从导线上脱落,这导致熔滴直径增大、熔滴过渡周期延长,影响金属填充效率。黄松涛等^[34]研究发现,压力的增加会使熔滴过渡平稳性变差,如图 11 所示,熔滴过渡形式由射流过渡逐渐转变为大滴过渡到排斥过渡,焊接飞溅、烟尘增多,表面成形越来越差。李凯等^[35-36]对高压干法气体保护焊 (GMAW) 的熔滴过渡行为进行了系统研究,发现随着环境压力的增加,熔滴过渡形式在小电流

条件下依次经历大滴过渡、短路过渡和排斥过渡,而在大电流条件下则依次表现为射流过渡、短路与射流混合过渡以及排斥过渡。研究表明,高压环境下存在熔滴过渡的临界转变压力,类似于常压下的临界电流,当压力超过该临界值时,熔滴过渡形式发生显著变化。在 0.1~2 MPa 高压条件下的实验结果显示,无论送丝速度如何,随着压力的增加,熔滴最终均转变为排斥过渡。这种现象的主要原因是高压导致电弧及弧根收缩,如图 12 所示,改变了熔滴的受力状态,促使熔滴以排斥方式向焊接方向脱离。排斥过渡通常伴随飞溅增多和熔滴转移方向的不稳定性,直接影响焊缝成形质量和焊接过程的稳定性。

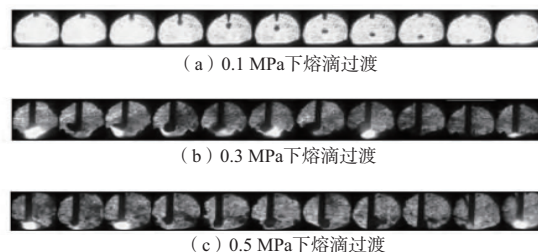


图 11 局部干法焊接不同环境压力下的熔滴过渡

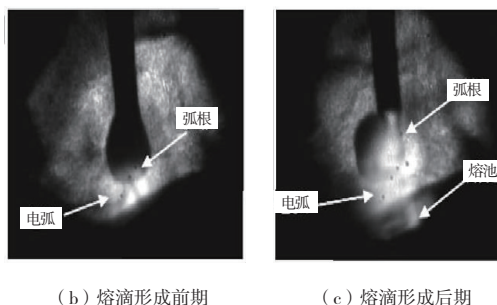
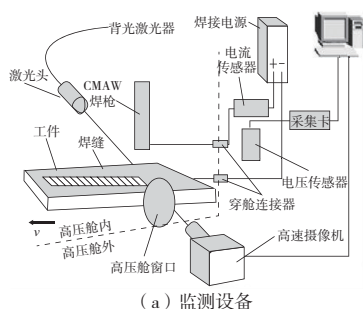


图 12 高压干法焊接熔滴行为监测设备及高压干法排斥过渡形成过程

湿法焊接中,气泡的扰动使熔滴的轨迹和形态发生变化,导致熔滴转移的不确定性增大;而干法焊接中,高压环境影响熔滴的受力状态,使熔滴过渡模式发生显著变化,并在一定压力条件下转变为排斥过渡。这些环境因素的影响使得水下焊接的熔滴行为更加复杂,焊接质量控制更加困难。因此,水下焊接过程中的熔滴监测技术需要充分考虑环境因素的特殊性,寻找更加精准、可靠的监测与控制方法,以优化熔滴转移模式,降低飞溅损失,提高金属填充稳定性,并确保焊缝质量。

3 基于焊接过程监测的缺陷识别

焊接缺陷识别是一项用于评估焊缝质量的关键技术,通过多种检测手段,可及时发现焊接过程中可能产生的缺陷,如裂纹、气孔、未熔合、夹渣等,从而保障焊接结构的完整性与安全性。目前,超声波检测、X 射线探伤、磁粉检测、渗透检测等传统方法仍是主要的焊接质量评估手段^[37]。尽管这些方法在缺陷检测方面发挥了重要作用,但由于它们大多依赖于焊后检测,难以满足现代制造业对焊接质量实时监控和高效检测的需求,同

时操作复杂、成本较高,在实际应用中存在一定的局限性。因此,为了提高检测效率并实现焊接过程的实时监控,研究人员开始探索基于单一传感器的实时监测技术。

近年来,单信息监测技术被逐步引入焊接缺陷检测中。采用希尔伯特黄变换对水下焊接电信号的多域特征进行提取,建立电信号特征矩阵并构建质量分类模型。张为民等^[38]提出了一种结合电信号与其他焊接参数的智能化质量检测方法,通过实时采集焊接电流、电弧电压数据,结合焊缝宽度、焊接速度、送丝速度和焊炬高度等信息,构建基于最小二乘支持向量机的熔深预测模型,并通过在线预测焊接熔深模糊逻辑推断焊接质量级别,实现船舶水下焊接质量在线监测。

单信息监测在部分应用场景中已展现出有效性,能够提供较为直接的焊接缺陷评估依据。然而由于水下环境的复杂性,例如气泡干扰、高压影响、电弧不稳定等因素,单一传感器往往难以全面获取焊接质量信息,导致检测精度受限。因此,在水下焊接场景下,仅依赖单一信息源往往不足以提供高精度的焊接缺陷评估。为提高焊接缺陷识别的准确性和鲁棒性,多源信息融合技术应运而生。通过将视觉、声学、电信号、温度等多种数据源进行融合,能够提供更全面的焊接缺陷评估,克服单一检测方法的不足,从而实现更高效、实时的质量监控。ZHANG 等^[39]通过在线监测电弧声和电压的频谱信号,实现了钨极气体保护焊中铝合金焊缝质量的实时自动评估。研究表明:基于多传感器的分类器在识别焊缝缺陷方面比基于单传感器的分类器具有更高的准确率。张志芬^[40]基于光谱传感、声音传感、电压传感及视觉传感技术,开展了铝合金脉冲 GTAW 过程中的缺陷识别与预测研究。通过多传感器融合,有效弥补了声音信息在识别未焊透和焊漏缺陷中的不足,最终将缺陷识别准确率从单一传感模型的 74.19% 提高到了 94.31%。类似地,刘先森^[41]在窄间隙 P-GMAW 焊接过程中,基于电流、电压、视觉传感等信息融合技术,实现了对熔合良好、临界熔合、未熔合 3 种焊缝熔合状态的准确预测,识别率高达 96.67%。

水下焊接因其特殊的环境条件,面临诸多挑战,包括焊接过程不稳定、质量检测难度高以及实时性需求未能满足。目前,水下焊接质量检测主要依赖传统的焊后检测手段,尽管在单信息源监测和行为特征研究方面取得了一定进展,但在多

源信息融合技术的应用上仍处于初步探索阶段。多源信息融合技术因其在复杂环境中的显著优势,为水下焊接缺陷识别提供了新的可能。通过整合多模态数据,可以更全面地评估焊接接头质量,弥补单一检测方法的不足。

4 结语

水下焊接是海洋工程中至关重要的技术之一,其在保障能源安全、海洋结构建设和修复方面具有不可替代的作用。然而,由于水下环境的复杂性和特殊性,其焊接质量面临诸多挑战。现有水下焊接质量检测方法在评估焊缝完整性和焊接接头缺陷方面取得了一定成就,但在实时性、精确性和复杂环境适应性等方面仍存在不足。本文从水下环境对焊接过程的影响出发,梳理了电信号、电弧和熔滴等技术手段的发展脉络,并探讨了水下焊接缺陷识别未来研究和应用的方向。现有研究工作中,在水下环境对焊接过程的影响、信息实时监测及缺陷识别等方面取得了一定成果。从湿法焊接到干法焊接,不同焊接方法在操作便捷性与质量保障方面各具优势;且焊接过程中通过实时监测电信号、电弧特性及熔滴行为,有效提升了焊接过程控制的精度。此外,陆上焊接领域的多源信息融合技术也为水下焊接缺陷识别提供了有益参考。

然而,尽管已有显著进展,水下焊接过程中信息传感的稳定性与融合精度仍未能完全满足工程应用的需求,特别是在复杂环境下。多源信息的实时融合与可靠性仍需进一步加强,且环境干扰对焊接缺陷识别的影响问题尚未完全解决。针对这些挑战,未来研究方向可从以下几个方面展开。

1) 开发多源信息融合技术与智能诊断方法。水下焊接过程中,电信号、电弧光谱、温度场等多源信息的实时采集和融合是实现缺陷高精度识别的关键。目前,多源信息融合在水下焊接中的研究尚处于起步阶段。未来需要结合水下环境的特殊性,进一步开发适应高压、低能见度条件的多模态传感器,并优化数据融合算法,提升焊接缺陷识别的实时性和精度。

2) 完善适用于水下环境的传感器与检测设备。水下焊接环境对检测设备提出了更高要求,包括耐高压、抗腐蚀以及抗信号干扰的能力。未来需研发新型多模态传感器和高分辨率信号采集系统,提升复杂水下环境中的信息获取效率。与此同时,还需优化传感器与监测设备的模块化设

计,开发适用于多种焊接场景的检测平台,以降低设备开发和使用成本。

3) 构建智能化焊接质量预测与控制系统。通过结合实时监测数据与焊接过程的多物理场模拟,构建高精度焊接质量预测模型。一方面,这将显著提高工艺参数优化效率,减少研发成本;另一方面,通过揭示水下焊接过程中的热输入、应力分布和缺陷形成机制,为实现智能化焊接质量控制提供依据。同时,开发能够集成监测、分析与控制功能的一体化系统,进一步提升水下焊接过程的可靠性与稳定性。

4) 实现焊接缺陷识别与优化的一体化智能系统。目前,水下焊接缺陷识别系统多为分散式模块,缺乏协同控制能力。未来,应致力于建立涵盖信息采集、融合分析和实时控制的一体化智能系统,将焊接质量监测、缺陷诊断与参数优化有机结合,提升焊接过程的自动化与智能化水平。通过这一系统,不仅能够实时调整焊接参数,还可以快速响应环境变化,实现对焊接质量的全程闭环控制。

参考文献:

- [1] 焦向东,朱加雷. 海洋工程水下焊接自动化技术应用现状及展望[J]. 金属加工(热加工),2013(2):24-26,32.
- [2] 周利,刘一搏,郭宁,等. 水下焊接技术的研究发展现状[J]. 电焊机,2012,42(11):6-10.
- [3] MAJUMDAR J D. Underwater welding - present status and future scope[J]. Journal of Naval Architecture and Marine Engineering,2008,3(1):38-47.
- [4] 蒋凡,李元锋,陈树君. 焊接电弧监测技术研究现状及展望[J]. 机械工程学报,2018,54(2):16-26.
- [5] 朱加雷,俞建荣,焦向东,等. 水下焊接技术研究和应用的进展[J]. 焊接技术,2005,34(4):1-3.
- [6] 史强. 水下焊接技术探究[J]. 产业与科技论坛,2012,11(24):66.
- [7] 梁亚军,薛龙,吕涛,等. 水下焊接技术及其在我国海洋工程中的应用[J]. 金属加工(热加工),2009(4):17-20.
- [8] 陈英,许威,马洪伟,等. 水下焊接技术研究现状和发展趋势[J]. 焊管,2014,37(5):29-34.
- [9] GUO N, WANG M R, DU Y P, et al. Metal transfer in underwater flux-cored wire wet welding at shallow water depth[J]. Materials Letters,2015,144:90-92.
- [10] JIA C B, ZHANG Y, ZHAO B, et al. Visual sensing of the physical process during underwater wet FCAW[J]. Welding Journal, 2016, 95(6): 202-209.
- [11] VASHISHTHA P, WATTAL R, PANDEY S, et al. Problems encountered in underwater welding and remedies- a review[J]. Materials Today:Proceedings, 2022,64:1433-1439.
- [12] 姚顺平. 水下局部干法焊接机器人局部罩端流气体的数值模拟及焊接工艺研究[D]. 南昌:南昌大学,2012.
- [13] 余巍,张京海,易传宝,等. 环境条件对熔敷金属中扩散氢含量的影响[J]. 材料开发与应用,1999,14(1):8-11.
- [14] OMAJENE J E, MARTIKAINEN J. Fundamental Difficulties Associated With Underwater Wet Welding[J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2014, 4(6): 26-31.
- [15] 李瑞晨. 电弧焊熔池图像的特征提取及分类研究[D]. 成都:西南交通大学,2023.
- [16] 李康. 基于数据驱动的水下焊接质量分类模型研究[D]. 武汉:华中科技大学,2023.
- [17] JIA C B, ZHANG T, MAKSIMOV S Y, et al. Spectroscopic analysis of the arc plasma of underwater wet flux-cored arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology,2013,213(8):1370-1377.
- [18] 黄晋,石永华. 水下湿法焊接浅水环境下 FCAW 电弧静特性[J]. 焊接技术,2011,40(8):15-18,79.
- [19] 李志辉. 双相不锈钢药芯焊丝水下干法脉冲焊接电信号分析及焊缝成形的研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.
- [20] 黄晓涛,石永华,李志辉,等. 水下干法脉冲焊接电信号的稳定性[J]. 电焊机,2016,46(1):23-27.
- [21] 徐翔. 水下湿法焊接电弧等离子体温度及其组分研究[D]. 南昌:华东交通大学,2020.
- [22] 韩旭. 焊接过程监测技术研究现状[J]. 现代制造技术与装备,2023,59(4):83-85.
- [23] 杨乾铭. 水下焊接电弧温度的光谱诊断研究[D]. 广州:华南理工大学,1996.
- [24] SCHMIDT H P, SPECKHOFFER G. Experimental and theoretical investigation of high-pressure arcs[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,1996,24(4):1229-1238.
- [25] 赵华夏,焦向东. 干式高压环境对 TIG 焊接电弧温度的影响[J]. 焊接学报,2008,29(11):17-20.
- [26] 黄继强,薛龙,黄军芬,等. 高压环境下 CMT 焊接电弧行为及焊缝性能[J]. 金属学报,2016,52(1):93-99.
- [27] XING C J, JIA C B, HAN Y F, et al. Numerical analysis of the metal transfer and welding arc behaviors in underwater flux-cored arc welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2020,153:119570.
- [28] WU S J, GONG S, GAO H M. Arc characteristics of GTAW under high pressure[J]. Sādhanā, 2019, 44(3):70.
- [29] 贾滨阳. 高压气体环境对 GMAW 焊电弧形态影响[D]. 北京:北京化工大学,2012.
- [30] HUANG J Q, GUO W W, HUANG J F, et al. Arc contraction behavior of GMA welding process based on change of arc length at hyperbaric air condition[M]// Transactions on Intelligent Welding Manufacturing. Singapore:Springer Singapore,2020:47-60.

(下转第16页)

- 收稿日期:2025-04-02

- [31] HAN Y F, JIA C B, ZHANG M F, et al. Key mechanisms and process features of the metal transfer and cavity evolution during underwater submerged arc welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 319: 118053.
- [32] XU C S, GUO N, ZHANG X, et al. Internal characteristic of droplet and its influence on the underwater wet welding process stability [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 280: 116593.
- [33] LIAO H P, ZHANG W X, LI X Y, et al. Numerical simulation and experimental verification of droplet transfer during local dry underwater MIG welding process of SUS304 [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 1960-1973.
- [34] 黄松涛, 谷孝满, 焦向东, 等. 高压环境脉冲电流控制对熔滴过渡的影响 [J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 25-29, 114.
- [35] 李凯, 高洪明, 李海超, 等. 环境压力对高压干法 GMAW 熔滴过渡影响分析 [J]. 焊接学报, 2014,

- 收稿日期:2025-04-02