

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.24

# 水下湿法焊接关键工艺问题及调控措施的研究进展

李超航, 赵 博\*, 咎佳岐, 王铭贺, 刘浩男

山东建筑大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250101

**摘要:** 水下湿法焊接技术由于其成本低、对工件形状和接头形式限制少、配套设备少等优点已成为国内外水下工程技术研究的热点之一。对比了湿法、局部干法、干法等水下电弧焊方法, 分析水下湿法焊接用于大规模海洋设施结构的制造及维护的优势。总结了当前水下湿法焊接工艺中的突出问题: 接头氢含量高带来裂纹等风险、水环境中冷却速度过快影响焊缝组织和性能、焊接过程(气泡、电弧、熔滴过渡)不稳定导致接头不可靠。随后分别针对上述工艺问题, 总结近十几年来学者提出的调控方法, 如通过调整焊材成分、调整工艺参数以及加入隔离措施来降低焊缝中的氢, 通过辅助热源及保温措施避免接头过快冷却, 通过脉冲焊接电流或附加超声的方法改善气泡、电弧及熔滴过渡的不稳定等。总结了近年来较热门的通过外加辅助能场调控水下湿法焊接的最新进展。

**关键词:** 湿法焊接; 电弧气泡; 能场辅助; 熔滴过渡

中图分类号: TG456.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0159-11

## Research Progress on Underwater Wet Welding —— Key Process Issues and Control Measures

LI Chaohang, ZHAO Bo\*, ZAN Jiaqi, WANG Minghe, LIU Haonan

School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China.

**Abstract:** Underwater wet welding technology has become a hot research topic in underwater engineering technology both domestically and internationally due to its advantages such as low cost, less restrictions on workpiece shape and joint form, and fewer supporting equipment. This article first compares underwater arc welding methods such as wet method, local dry method, and dry method, and analyzes the advantages of underwater wet welding used for the manufacturing and maintenance of large-scale marine facility structures. Then, the prominent problems in the current underwater wet welding process were summarized: high hydrogen content in the joints brings risks such as cracks, too fast cooling speed in the water environment affects the microstructure and performance of the welds, and unstable welding processes (such as bubbles, arc and droplet transfer) lead to unreliable joints. Subsequently, in response to the above-mentioned process issues, the control methods proposed by scholars in the past decade were summarized, such as adjusting the composition of welding materials, adjusting process parameters, and adding isolation measures to reduce hydrogen in the weld seam, avoiding rapid cooling of the joint through auxiliary heat sources and insulation measures, and improving the instability of bubble, arc, and droplet transfer through pulse welding current or additional ultrasound methods. In addition, the latest developments in the regulation of underwater wet welding through external auxiliary energy fields, which have been popular in recent years, are specifically summarized.

**Keywords:** wet welding; arc bubble; energy field assistance; droplet transfer

**引用格式:** 李超航, 赵博, 咎佳岐, 等. 水下湿法焊接关键工艺问题及调控措施的研究进展[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 159-169.

**Citation:** LI Chaohang, ZHAO Bo, ZAN Jiaqi, et al. Research Progress on Underwater Wet Welding —— Key Process Issues and Control Measures [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 159-169.

收稿日期: 2023-09-13 修回日期: 2023-11-16

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52105378); 山东省自然科学基金青年项目(ZR2021QE093)

作者简介: 李超航(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事超声辅助水下湿法焊接工艺研究。

通讯作者: 赵 博(1988—), 男, 硕士生导师, 主要从事水下焊接工艺, 焊接过程的控制与改型等研究。E-mail: zhaobo19@sdjzu.edu.cn。

## 0 引言

经济的快速发展以及地缘安全形势的变化对海洋空间的利用及保护提出了紧迫需求<sup>[1-2]</sup>。海洋油气资源的开采、海底隧道和管道的铺设以及各类海上工程装备的建设维护近年来如火如荼,上述情况对水下焊接这一关键制造和修护技术提出了较高的要求<sup>[3-4]</sup>。为了解决这些问题,研究人员进行了大量的实验和理论研究,提出了多种调控措施,包括调整焊接材料、优化工艺参数、采用辅助热源、应用脉冲电流和超声技术等。这些方法在一定程度上改善了水下湿法焊接的质量,但仍面临着稳定性、适应性和经济性的挑战。特别是随着海洋开发向深水区域的推进,水下湿法焊接技术在大深度和复杂环境下的应用亟待突破。

本文旨在综合评述近年来水下湿法焊接技术的研究进展,分析当前面临的主要工艺问题,探讨各种调控措施的机理和效果,并展望未来的研究方向。通过对现有研究成果的系统总结,本文可以为水下湿法焊接技术的研究同行提供参考。

## 1 水下湿法焊接的工艺特点及优势

### 1.1 典型水下电弧焊接方法的比较

水下电弧的历史可以追溯到18世纪初,英国科学家戴维发现在水下焊接时焊接电弧可以在水中燃烧。水下湿法焊接第一次成功应用的报道是英国海军在一战期间修补漏水的舰船<sup>[5]</sup>,然而水下焊接的广泛应用和深入研究还是在近三十年<sup>[6]</sup>。当前,常见的水下电弧焊接方法有水下湿法焊接、水下干法焊接以及局部干法焊接,其中水下干法焊接又可分为常压干法焊接和高压干法焊接<sup>[7]</sup>,如图1所示。干法焊接是在施焊区域周围搭建排水舱,注入气体排出舱内的水,实现在气体环境中焊接。特别地,常压干法一般需要使用密封舱室,要将舱内的压力降低到1个大气压左右来模拟陆上焊接环境,如果在较浅的近岸水域中施焊,可采用围堰法,即在施焊区域周围建立挡水墙来排开水体<sup>[8]</sup>。干法焊接的接头质量较为接近陆上焊接,然而,针对不同的待焊结构、接头形式、焊接位置和焊接设备,都

需要设计并建造专门的排水舱,且几乎不可能再应用于其他的焊接结构,导致该方法的生产周期长,成本高,适应性较差。高压干法焊接虽不使用完全密闭的舱室,也不需要维持标准大气压,相对于常压干法焊接的密封舱造价有所降低<sup>[9]</sup>,但高压干法焊接仍需要排水装置,对接头形式、焊接位置、结构的形状尺寸仍有一定的限制,不够灵活,生产周期长,难以大规模应用,其焊接质量相比于常压干法较差<sup>[10]</sup>。局部干法焊接采用小型排水罩、水帘、钢丝刷等局部排水装置,借助保护气体将电弧附近区域的水排开,形成可容纳电弧的气体环境,依托该局部空间进行焊接<sup>[11]</sup>。局部干法相较于干法焊接不需要建造大型昂贵的舱室,适应性也有所改善<sup>[12]</sup>,但该方法仍然诸多不足:依赖复杂的进气排水装置,且焊接接头与周围水没有完全隔绝,无法保护焊缝免受水的急冷作用;排水装置内的水流和气流较为湍急,对电弧有一定影响;为了保证排水效果,排水装置需要紧贴工件表面,对接头形状也有一定的限制;排水装置阻挡潜水焊工的视线;目前可应用的水深较浅。综上所述,干法焊接及局部干法焊接的大规模应用将面临成本和适应性问题<sup>[12]</sup>。此外,近年来也积极探索新型焊接工艺如激光焊、等离子弧焊等在水下的应用,但目前还主要停留在毫米级、厘米级水深的学术研究阶段<sup>[13]</sup>。

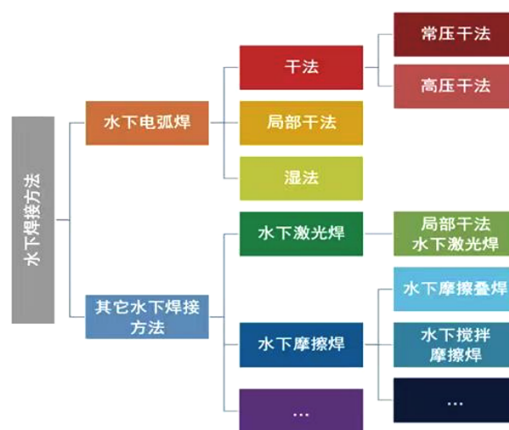


图1 水下湿法焊接方法分类

Fig. 1 Classification of underwater wet welding methods

相较于上述方法,水下湿法焊接借助焊丝药芯或者焊条药皮受热反应形成的局部气体空间维持电弧燃烧,不需要相应的排水装置以及排水舱,适应各种焊接位置和接头形式,对工件表面形状或接

头没有特殊要求,配套设备少<sup>[14-15]</sup>。Rowe、理查森等人指出,水下湿法焊接的成本低、操作方便,生产效率高,设备简单,被广泛用于维护和修理海上结构<sup>[16-17]</sup>。Barnabas指出我们通常难以将泄露的管道或者沉没的船舶带到岸边进行焊接,而水下湿法焊接工艺的出现就为海洋工程的水下现场原位修补施工提供了便利条件,该工艺近年来一直用于修复海上管道及其他工程结构,特别是在深度小于60米时<sup>[18]</sup>。海洋工程和装备面临风浪、腐蚀挑战,服役环境十分恶劣,随着大型海工装备、远洋大型船舶、海底管线、油气井、风电场等海上设施的增多,水下工程在役维护的需求也将猛烈增长,水下湿法焊接以其经济性和适应性,将具有良好的应用前景。

## 1.2 水下湿法焊接原理

根据焊材的不同,常见的水下湿法焊接技术主要分为水下药芯焊丝电弧焊(Flux Cored Arc Welding, FCAW)和水下手工电弧焊(Shielded Metal Arc Welding, SMAW)<sup>[19]</sup>。在引弧阶段,当焊条或者焊丝与工件接触形成短路时,空载电压引发相当强的电流,接触处熔断,同时周围的水在热量的作用下汽化形成一个气相区,在热和电压作用下气体放电形成电弧。在电弧的连续热作用下,水继续分解产生气体。同时,随着焊丝或焊条持续熔化,药芯或药皮中的造气剂受热不断产生气体,与水分解产生的气体一起在电弧周围形成气泡,为电弧提供空间。气泡长大到一定程度会发生破裂,分离成小气泡逐渐上浮,但伴随着药芯反应造气以及水的汽化,电弧处的气泡不断获得气体补充。理想情况下,电弧处的气泡周期性增大减小,但可以让电弧一直处于气相区,维持较为稳定的水下湿法电弧焊过程。Pessoa等人指出水下药芯焊丝电弧焊的熔敷速度更高,自动化程度更高,有望成为水下手工电弧焊最有前途的替代方案<sup>[21]</sup>,其工作原理如图2所示<sup>[20]</sup>。Wang等人指出,使用水下湿法药芯电弧焊的高强钢接头性能优越,并在海底管道装配和在役维护上有着巨大的潜力<sup>[22]</sup>。

## 2 水下湿法焊接的主要工艺问题

如前文所述,水下湿法焊接有着显著的应用优

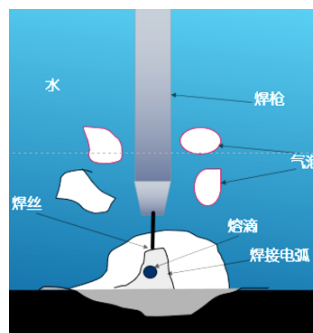


图2 水下湿法FCAW原理

Fig. 2 Schematic diagram of underwater wet FCAW

势,但当前技术也面临着显著的工艺问题:

首先,在电弧热作用下水会解离产生大量游离氢,极易导致气孔、氢脆等问题。据报道,水下焊缝中每100g熔敷金属的扩散氢含量高达22.85至44.12 mL,远高于常见陆上焊缝<sup>[23]</sup>。

其次,水的快速冷却能力可导致显著增大的工件冷却速率,导致热影响区和焊缝组织恶化,进而导致接头力学性能的下降<sup>[24-25]</sup>。赵博指出由于水的比热容大、黏性小、易于流动以及存在沸腾相变等原因,不同温度下水下焊件表面的换热速度相较于陆上焊接会有数倍到上百倍不等的增加<sup>[26]</sup>。Oma-jene使用人工神经网络算法预测焊缝性能,通过控制输入参数发现焊缝金属周围的水导致焊缝快速冷却,进而导致焊缝金属的伸长率和抗拉强度分别降低了50%和20%,此外,在较低的水温下,扩散氢含量增加,氧含量减少<sup>[27]</sup>。

最后,水下湿法焊接过程极不稳定,电弧燃烧、熔滴过渡和熔池流动等一系列行为都表现出与陆上焊接截然不同的特点<sup>[28-29]</sup>。(1)水下电弧会因水的冷却和环境压力作用,而在很大程度上收缩,电弧不稳定且易产生熄弧<sup>[20]</sup>,这也成为了水下湿法焊接的典型问题之一<sup>[30-31]</sup>。Meneses等人的研究指出,在水下湿法焊接过程中,环境压力的增加容易出现不稳定的电弧燃烧<sup>[32]</sup>。Li等人指出不稳定的电弧会恶化焊缝外观,增加焊接缺陷<sup>[33]</sup>。(2)水下熔滴往往尺寸较大,过渡频率低,受力不稳定,过渡方向和落点不统一,造成焊缝成形不规则,并带来飞溅问题<sup>[34]</sup>。Guo等人利用X射线成像技术对熔滴过渡过程进行了拍摄,证明了水下湿法焊接过程中熔滴在焊丝尖端左右摇摆甚至上浮,形成远超焊丝尺寸的

大尺寸熔滴,如图3所示<sup>[35]</sup>。借助定性数学分析,该团队指出电弧所依存的气泡内存在上升气流,气体拖曳力是导致熔滴向下过渡困难的主要因素。Yang等人通过高速摄像得出,在电弧气泡分离阶段时,颈部的气流拖曳力最大,当熔滴下落到颈部上方时,由于气流拖曳力的存在很容易将分离的气泡带走形成飞溅物<sup>[31]</sup>。(3)要解决水下焊接电弧稳定性问题,调控优化熔滴过渡过程,先要保证电弧气泡的稳定<sup>[36]</sup>。诸多工艺问题和接头性能问题都可能与水中的气泡不稳定有关<sup>[34]</sup>,包括熔池区域的热损失增加、熔滴过渡难、工艺稳定性差等。气泡呈现出极不稳定的“增大-缩颈-分离”周期性变化,虽然过去几年学者对水下焊接过程中笼罩电弧的气泡开展了研究,但是对气泡运动的规律和机理认知还并不充分<sup>[33]</sup>。赵博开展了水下湿法焊接电弧和气泡行为的数值计算,结果显示气泡在缩颈时,缩颈处会形成高速向上的气流,一方面可加剧熔滴和电弧的不稳定,另一方面会降低缩颈处的静压力,加速气泡的缩颈和脱离,导致维持电弧的气泡下半部分体积变小<sup>[26]</sup>。Yang等人通过实验观察进一步指出,气泡分离阶段缩颈处的气流拖曳力最大,当缩颈位置过低,而熔滴下落到颈部上方时,由于气流拖曳力的存在很容易将分离的气泡带走形成飞溅物<sup>[31]</sup>。总之,水下湿法焊接过程中的电弧及其所依存的气泡、熔滴过渡行为极不稳定,这将不利于焊缝成形和接头的可靠性。

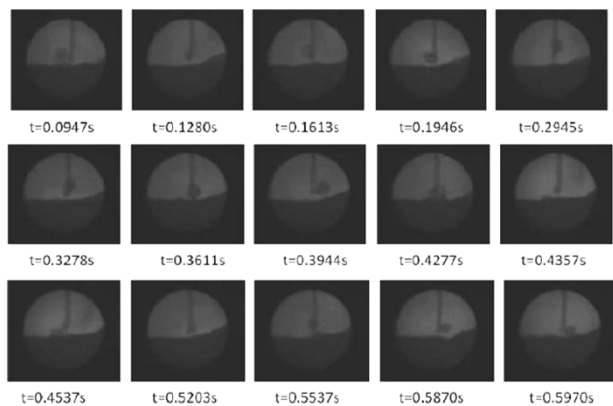


图3 水下湿法焊接熔滴过渡X射线图像<sup>[35]</sup>

Fig. 3 Droplet transfer images for underwater wet welding taken by X-ray<sup>[35]</sup>

此外,多数学者认为,随着水深的增加,环境压力的增加也容易导致不稳定的电弧燃烧,还可能增

加焊缝的气孔率<sup>[37-38]</sup>。此外,Chen等人的研究<sup>[39]</sup>展现了水流对水下湿法焊接焊缝的成形和工艺开裂敏感性的影响,随水流速度的增加,焊缝成形的稳定性降低,如图4所示;在较高水流速度下,接头断裂的主要原因是微裂纹和氧化物型夹杂物。综上,水下湿法焊接还较难克服大水深和水流较大的环境+盐度。但目前针对深水 and 流水环境中的湿法焊接研究还很少。

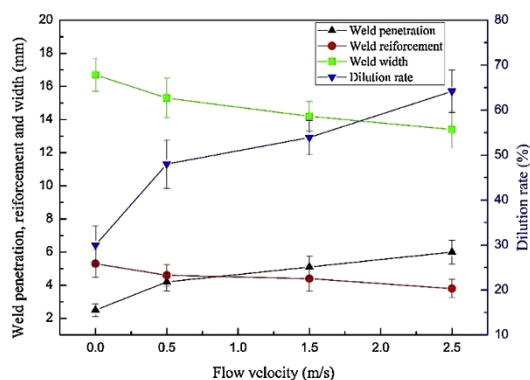


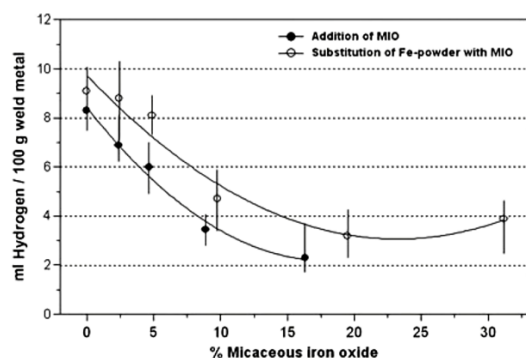
图4 水流速度对焊缝参数的影响<sup>[39]</sup>

Fig. 4 The influence of water flow velocity on weld parameters<sup>[39]</sup>

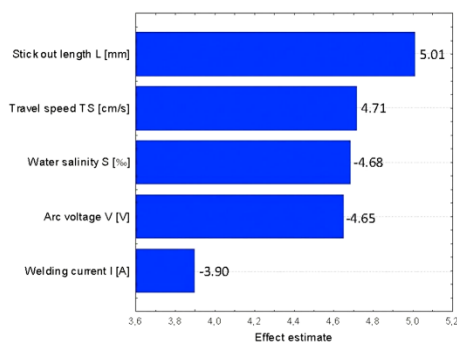
### 3 针对水下湿法焊接工艺问题的调控研究

#### 3.1 扩散氢问题的调控

针对上述接头氢含量高及相关焊接缺陷问题,陆上焊接领域已经有比较充分的研究,调整焊接材料配方是常见的控氢方法,值得水下焊接借鉴。例如Plessis等人在碱性焊条药皮中添加云母氧化铁(Micaceous Iron Oxide, MIO),利用其氧化性以降低焊缝金属中的扩散氢含量,如图5所示<sup>[32]</sup>。Klett等人在水下湿法焊接实验中发现将焊条中纤维素的质量分数控制在2%以下可抑制焊缝的氢含量<sup>[37]</sup>;Santos等人采用外部用防水层包裹的金红石低合金铁素体焊条进行水下湿法焊接,可获得较低的扩散氢含量和优异的力学性能<sup>[40]</sup>;氟化物在控制扩散氢方面也表现出优异效果<sup>[41]</sup>。此外,针对湿法焊接特点,近年来有多位学者通过改变焊接参数或增加隔离辅助装置等措施控制接头氢含量。Świerczyńska采用甘油法测定熔敷金属中的扩散氢含量,并根据Plackett-Burman法设计多工艺参数影响下的水下

图5 云母氧化铁添加量对焊缝中扩散氢含量的影响<sup>[32]</sup>Fig. 5 The effect of mica iron oxide on the diffusion hydrogen content in welds<sup>[32]</sup>

焊接实验,实验结果显示焊接电流、电弧电压和周围水盐度的增加可减少熔敷金属中扩散氢的含量,各因素的帕累托效应影响如图6所示<sup>[23]</sup>。可以推测电弧挺度的加强和水中氢元素含量的降低均有利于降低焊缝氢含量,反之焊丝伸长量和焊接速度的增加更容易使水侵入电弧区域,易导致焊缝氢含量增加。Zhang等人在焊枪上组装一种新型的液体屏蔽装置,用甘油将水从焊接区域排出,大大降低了水中氢元素进入焊缝的机会。其装置有助于降低扩散的氢含量和气孔率,但类似于局部干法的保护罩装置增加了工艺的复杂性,降低了适应性<sup>[42]</sup>。他们还设计了一种中性熔渣体系,可在熔池表面形成稳定的熔盐保护层,构成与水环境的机械隔离。使用纯Ni外层的药芯焊丝时,可得到无气孔的焊缝,熔敷金属扩散氢含量为3.61 mL/100 g,接近陆上焊接水平<sup>[43]</sup>。Li等人对低合金钢和不锈钢进行水下焊接实验,得出镍基焊缝金属具有低扩散氢含量、低氢致裂纹倾向等优点,可获得性能较优异的焊接

图6 工艺参数的改变对焊缝中扩散氢含量的影响<sup>[23]</sup>Fig. 6 The effect of process parameters on the diffusion hydrogen content in welds<sup>[23]</sup>

接头<sup>[33,36,42]</sup>。陈昊等人在焊枪前方引入超声作用调控湿法焊接过程,超声波的加入促进了熔池中气体的逸出,减少了气孔和扩散氢含量<sup>[44]</sup>。

### 3.2 高速冷却问题的调控

水环境的极端冷却条件、水流、压力等也是水下湿法焊接必须要克服的环境因素。张洪涛、胡乐亮等人采用外加感应加热辅助方法降低水下湿法焊接接头的冷却速率,延长焊接接头的冷却时间,避免马氏体及上贝氏体组织的生成,一定程度上改善了焊接接头的力学性能。随着感应热量的增大,焊接接头的抗拉强度也会随之增加<sup>[45-46]</sup>。Labanowski在湿法焊接双相不锈钢水下湿法焊接实验中,通过增加热输入减少甚至消除了冷裂纹等缺陷<sup>[47]</sup>。较早年间,学者们通过为电弧区域和工件表面增加保温物质,隔离水和电弧或者水和焊接接头,起到缓冷作用<sup>[20]</sup>。赵博通过数值模拟研究认为熔渣的保温作用十分有限<sup>[26]</sup>。当前,由于水在过热固体表面会产生复杂的多形态沸腾现象,熔渣和气态分子团在工件表面存在非致密层,目前还缺乏对水下湿法焊接过程中熔池、熔渣、气体、水体之间换热的系统研究。

### 3.3 工艺不稳定性问题的调控

水下湿法焊接过程的不稳定性包括气泡行为、熔滴过渡、电弧燃烧等过程的不稳定性及飞溅等现象,笼罩电弧的水下气泡不稳定的周期性变化、电弧电参数的剧烈波动、过于缓慢且落点不定的熔滴过渡过程构成了典型的水下湿法焊接过程不稳定现象,他们之间又有着复杂的相互影响。近年来学者们开展了上述不稳定现象的影响因素研究,并随之开展了多维度的调控尝试。

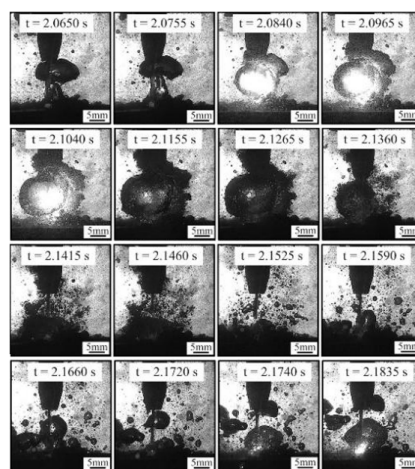
#### 3.3.1 电弧气泡和电弧行为的调控

水下湿法焊接时,水中会存在大量的气泡<sup>[31]</sup>,其中,电弧的稳定燃烧需要依靠笼罩住电弧的气泡(为与不断分离出来的小气泡相区别,下文中笼罩电弧的气泡称为“电弧气泡”)的保护<sup>[47]</sup>。张勇认为电弧稳定燃烧的过程与电弧气泡的生成相互制约,只有电弧稳定燃烧,才能获得体积更大的电弧气泡,而若没有电弧气泡保护,电弧也易于熄灭<sup>[48]</sup>。Tsai等人进行了水下气泡动力学的数学推导出结论,湿法焊接中的热损失与气泡的上浮密切

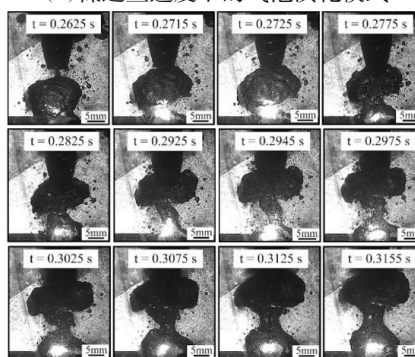
相关<sup>[49]</sup>。数值模拟结果显示电弧气泡水平方向的长大过程和向高度方向生长的初期往往比较稳定,而气泡在高度上增长到一定程度后,内部电流密度、静压力开始变得不稳定,接下来面临缩颈和上下部分的分离,此时不稳定的气泡威胁到电弧的生存<sup>[50]</sup>。多位学者也关注到电弧气泡上下分离也即新旧电弧气泡“接续”的时刻,如Oliveira等人发现电弧气泡的分离会导致焊接电流的快速变化<sup>[51]</sup>;Frederico关注了电弧气泡的分离与是否熄弧的关系,新气泡的体积在旧气泡分离出去的瞬间能否足以容纳电弧固然直接决定着电弧的存续,而泡内成分也至关重要,由于“接续”时刻气泡较小,电弧与气水界面十分接近,可能解离水分子并电离产生较多的自由氢,氢元素过多可能会导致电弧等离子体电导率的下降,影响电弧稳定。因此,Mendonça尝试通过控制焊接参数优化电弧气泡直径,改善对电弧的保护<sup>[52]</sup>。

王建峰等人研究了不同工艺参数下的电弧气泡的演化模式,如图7所示。随着送丝速度(焊丝直径1.2 mm)从4.5 m/min(见图7a)增加到6.5 m/min(见图7b),热输入增加,气泡体积增大,熄弧时间大大减少,随着送丝速度的进一步增加达到10 m/min,见图7c,在原电弧气泡上浮过程中有更多时间形成新的足够大的气泡。新形成的气泡与前一个气泡的有效接触面积可以覆盖整个电弧的燃烧区域,使得电弧稳定燃烧。由于使用的焊机具备焊接电流自动适配送丝速度的功能,增大送丝速度会相应提高焊接电流,可得出一定范围内热输入的增加对电弧稳定有益的结论。但单独提高电弧电压效果不佳,由于较大的电弧电压引起的电弧刚度增加难以抵抗周期性上浮气泡的冲击效应,会使熄弧现象增加,如图7d所示<sup>[53]</sup>。

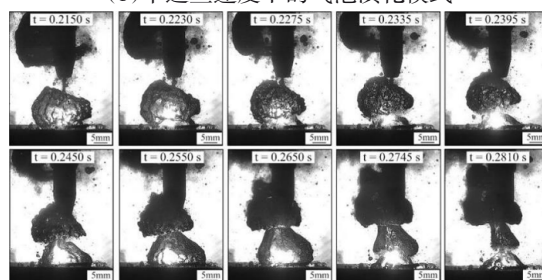
上述课题组还采用与焊枪同轴的机械装置和超声装置对气泡进行拘束来提高气泡的平均尺寸和演化稳定性<sup>[54]</sup>。加入约束后焊接电流和电弧电压的波动情况得到了明显改善,过高电压和低电压的占比降低,电弧的稳定性得到提高;超声作用下气泡的运动类似机械约束情况下,不再垂直上浮,气泡对熔滴的拖曳力和浮力减少,间接改善了熔滴过渡;由于上述因素,焊缝凹坑、飞溅等缺陷减少,



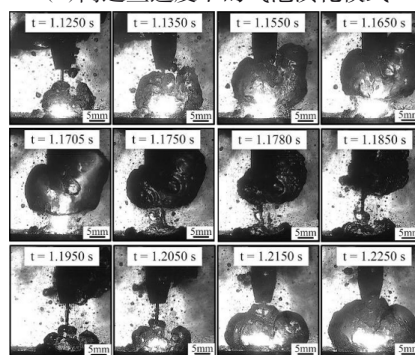
(a) 低送丝速度下的气泡演化模式



(b) 中送丝速度下的气泡演化模式



(c) 高送丝速度下的气泡演化模式



(d) 较高电弧电压下的气泡演化模式

图7 不同工艺参数下的电弧气泡的四种演化模式<sup>[53]</sup>

Fig. 7 Four evolution modes of arc bubbles under different process parameters<sup>[53]</sup>

焊缝成形质量得到改善。

### 3.3.2 熔滴过渡的改善

熔滴过渡是焊接过程中传质和传热的重要机制<sup>[42]</sup>。水下湿法焊接的熔滴过渡与陆上焊接存在明显差异<sup>[35]</sup>,在200A焊接电流下,熔滴过渡频率甚至会低于10 Hz<sup>[48]</sup>。Guo研究发现水下湿法焊接熔滴的过渡类型主要包括大角度及小角度滴状排斥过渡模式、短路爆炸过渡模式、表面张力过渡模式和潜弧过渡模式等,其中表面张力过渡模式最为稳定<sup>[55]</sup>。Jia等人选择波长808 nm的红外激光器作为背光,采用高速相机获取相对清晰的熔滴过渡图像,发现增大焊接电流可以提高表面张力过渡的比例,减少大滴状排斥过渡,减少飞溅,提高过渡稳定性<sup>[56]</sup>。针对水下湿法焊接工艺中熔滴过渡阻力大、过渡困难的问题,许多学者开发了一些工艺调控方法,包括优化焊接参数<sup>[55]</sup>、控制焊接电流和电弧电压波形<sup>[16]</sup>、脉冲送丝方法等<sup>[58]</sup>,其目的都是通过加强促进熔滴过渡的力,或减少阻碍熔滴过渡的作用,来实现相对高频的、稳定的熔滴过渡过程。王建峰等人在做3.3.1节所述研究时还发现气泡表面的超声辐射力将使气泡不再垂直上升,从而改变了其运动特性,因此气流的阻力和气泡上升形成的浮力对熔滴的影响明显减弱,导致阻碍熔滴过渡的力减小<sup>[58]</sup>。陈昊等人开发了一种旁轴的超声辅助熔滴过渡的方法用于水下湿法焊接,如图8所示<sup>[59]</sup>。位于焊枪一侧的倾斜超声振动头减缓了气泡的上升,也降低了熔滴排斥飞溅比例(9%降低到5%)和不稳定熔滴过渡比例(64%下降到41%),进而可以获得光滑且无缺陷的焊接接头。贾传宝团队利用

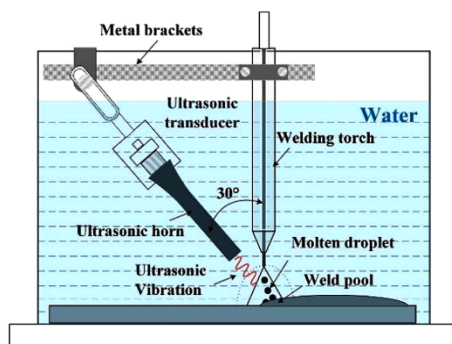


图8 旁轴超声辅助熔滴过渡的方法示意<sup>[59]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of the method of using paraxial ultrasound to assist droplet transfer<sup>[59]</sup>

脉冲电流波形实现熔滴的受控过渡,使熔滴更稳定地进入熔池,焊缝组织及接头力学性能得到优化。如图9所示,在受控脉冲电流影响下,熔滴的平均尺寸减小约20%,熔滴过渡周期均值降低28.4%(如图10),且过渡周期分布更为集中,过渡行为更加趋于一致,实现了过渡稳定性的明显改善<sup>[60]</sup>。杜永鹏亦开展脉冲电流水下湿法焊接研究,在热输入不变的情况下,借助脉冲峰值电流增大瞬间电磁收缩力,促进了熔滴过渡。研究发现,相对传统水下湿法焊接,该方法的熔滴排斥过渡比例可降低50%<sup>[19]</sup>。

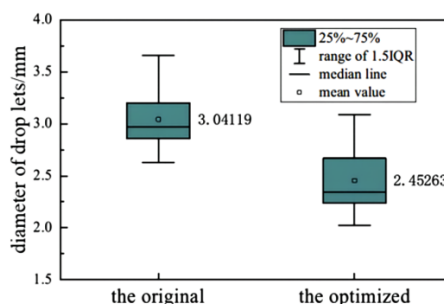


图9 不同脉冲电流下的熔滴尺寸变化<sup>[60]</sup>

Fig. 9 Droplet size with different pulse currents<sup>[60]</sup>

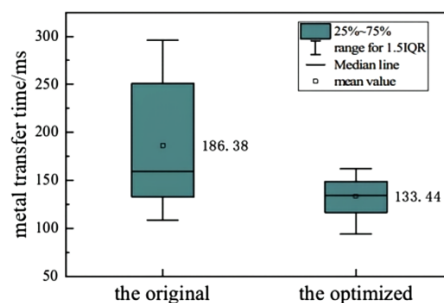


图10 不同脉冲电流下的熔滴过渡变化<sup>[60]</sup>

Fig. 10 Metal transfer time with different pulse currents<sup>[60]</sup>

### 3.4 能场辅助调控水下湿法焊接研究

近年来各类学者们通过向焊接工艺添加各类能量场调控焊接过程并取得良好效果,例如感应热场、电磁场、光能、超声场等。由于研究者众多,成果丰富,本文作者认为有必要单独对这类方法与水下湿法焊接的结合情况进行总结。电磁辅助电弧成型的方法,采用设计的线圈以交变电流产生交变磁场,在熔池中产生涡流,两者之间形成的斥力给熔池提供一个悬浮力以抑制熔池向下流淌,可以达到控制焊道形貌,提高成形件质量的目的<sup>[61]</sup>。磁场辅助调控熔池的流动和热量分布在陆上焊接与增材成形工艺中并不少见,但目前水下湿法焊接中使

用磁场调控还较罕见,可能与水-气泡-电弧环境的磁导率较为复杂有关。贾存锋<sup>[62]</sup>研究了激光对水下高压 MIG (Melt Inert-Gas) 焊接熔滴过渡的调控作用,发现加入激光辅助后熔滴过渡频率加快。在空气中的焊接过程中,激光精确照射熔滴,并促进其过渡是一种需要精密装备准确控制的技术,面对湿法焊接复杂的等离子体气泡-水烟反射环境以及高速波动的熔滴,难以保证激光照射在熔滴上,因此该类调控技术在湿法焊接的应用上有较大困难。

超声能场在各类材料加工过程中已展现出良好的性能调控能力,例如超声振动辅助焊接技术可改善熔池气孔率和焊缝力学性能<sup>[63-64]</sup>。近年来,学者们也积极将超声能量加载进水下焊接工艺中。徐昌盛等人将超声振动施加在电弧前方的工件上,发现没有施加超声辅助情况下的水下湿法焊接的气孔率是陆上焊接的三倍,施加超声后,气孔率降低 50%,且焊缝成形更加均匀<sup>[65]</sup>。Sun 等人<sup>[66-67]</sup>通过超声辅助获得了相对常规湿法焊接更高性能的焊接接头,比如接头抗拉强度提高了 46%。在湿法焊接中,超声除展现出陆上焊接中细化焊缝晶粒、减小气孔率的类似作用外,还可提高电弧气泡的稳定性,并间接提高了对电弧的保护作用,间接降低了对熔滴过渡的阻碍。在前文第 3.3.1 小节所述的研究基础上,王建峰比较了具有不同曲率半径的超声辐射端对湿法焊接气泡的调控性能,及对焊缝形貌的改善<sup>[68]</sup>。陈姬等人另辟蹊径,在传统焊接回路中耦合超音频电流,起到类似机械超声的调控效果,超音频电流辅助下的水下湿法焊接实验中,焊缝成形改善,飞溅现象减少<sup>[69]</sup>。

## 4 结论与展望

面对越来越多的海洋工程结构,规模化的建造和维护势在必行,水下湿法焊接因其出众的经济性和适应性成为了较为合适的工程选择。本文主要基于近十几年来针对水下湿法焊接工艺问题及相关调控的研究报道,总结如下:

(1) 水下湿法焊接不需要专用的排水装置,施工时间短,成本低,对接头形式和部件形状几乎没有限制,因而具有难以动摇的应用优势和良好的应

用前景。

(2) 由于水环境提供了大量的有害元素氢、远高于陆上焊接的冷却速度和极不稳定的电弧、熔滴存在环境,常规的水下湿法焊接工艺过程极不稳定,接头组织与性能难以保障。近十几年来,学者们对上述工艺问题的现象与原因开展了丰富而深入的研究。

(3) 在此基础上,学者们借鉴与发展了陆上焊接的调控方法,借助外加能场、焊材优化、开闭环控制等技术,在改善接头组织与性能、增加熔滴过渡频率、改善电弧稳定性方面取得了明显效果。需要指出的是,当前的调控方法往往仅能改善上述一部分问题,且部分方法增加了额外的复杂装置,削弱了湿法焊接的经济性和适应性;此外,还未见到水下湿法焊接应用于 20 米以上水深或远海海域的报道。因此,水下湿法焊接仍亟需开展更深入研究,使之真正成为经略海洋的有效制造技术。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 程双球,高兴,刘勇,等.《水下焊接作业要求》的制订与应用[J]. 焊接技术, 2022, 51(09): 127-130.  
CHENG S Q, GAO X, LIU Y, et al. Formulation and application of "Underwater Welding Operation Requirements"[J]. Welding Technology, 2022, 51(09): 127-130.
- [3] 韩凤起,李志尊,孙立明,等.水下湿法手工自蔓延焊接技术[J]. 焊接学报, 2019, 40(07): 149-155.  
HAN F Q, LI Z Z, SUN L M, et al. Research on underwater wet manual SHS welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(07): 149-155.
- [4] 马云鹤,李志尊,孙立明,等.水下湿法焊接技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2018, 17(47): 10-13.  
Ma Y H, Li Z Z, SUN L M, et al. Research Progress of Underwater Wet Welding Technology[J]. Hot Working Technology, 2018, 17(47): 10-13.
- [5] 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(04): 17-20.  
LIANG Y J, XUE L, LV T, et al. Underwater welding

- technology and its application in marine engineering in China[J]. MW Metal Forming, 2009(04): 17-20.
- [6] 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: 24-26+32.
- JIAO X D, ZHUA J L. The Application Status and Prospects of Underwater Welding Automation Technology in Ocean Engineering[J]. MW Metal Forming, 2013: 24-26+32.
- [7] 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.
- ZHOU L, LIU Y B, GUO N, et al. Research and Development Status of Underwater Welding Technology[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(11): 6-10.
- [8] 吴磊,宋红伟. 水下焊接技术的现状及发展趋势[J]. 管道技术与设备, 2012(02): 37-39.
- WU L, SONG H W. Current Status and Development Trends of Underwater Welding Technology[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2012(02): 37-39.
- [9] 王中辉,张东东. 高压焊接试验舱研究现状[J]. 焊管, 2012, 35(05): 50-53.
- WANG Z H, Z D D. Research Status of Hyperbaric Welding Test Chamber[J]. Welded Pipe and Tube, 2012, 35(05): 50-53.
- [10] Hu Y, Shi Y L, Sun K, et al. Microstructure evolution and mechanical performance of underwater local dry welded DSS metals at various simulated water depths[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 264: 366-376.
- [11] 裴凯. 局部干法水下脉冲MIG焊熔滴过渡特性研究[D]. 广东:华南理工大学, 2022.
- PEI K. Research on droplet transfer characteristics of local dry underwater pulsed mig welding[D]. Guangdong: South China University of Technology, 2022.
- [12] Liao H, Zhang W, Li X, 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.
- [13] 邢霄. 304不锈钢水下激光焊排水装置设计及焊接工艺研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2017.
- XING X. Design on Draining Water Device and its Welding Procedure Research in Underwater Laser Welding of 304 Stainless steel[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [14] 侯瑞麟. 局部干法焊接装置设计及其关键技术研究[D]. 黑龙江:东北石油大学, 2022.
- HOU R L. Research on the Design and Key Technology of Local Dry Welding Device[D]. Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2022.
- [15] Jacek T, Jerzy L, Dariusz F. Cold cracking of S460N steel welded in water environment[J]. Polish Maritime Research, 2018, 25(3): 131-136.
- [16] Rowe M, Liu S. Recent developments in underwater wet welding[J]. Science Technology Welding Join, 2001, 6(6): 387-396.
- [17] 杨杰. 水下湿法药芯焊丝焊接典型大滴排斥过渡数值模拟[D]. 山东:山东大学, 2021.
- YANG J. Numerical simulation of typical globular repelled metal transfer in underwater wet flux-cored arc welding (FCAW) [D]. Shandong: Shandong University, 2021.
- [18] Barnabas S G, Rajakarunakaran S, Pandian G S, et al. Review on enhancement techniques necessary for the improvement of underwater welding[J]. Materials Today, 2021, 45(2): 1191-1195.
- [19] 杜永鹏. 水下湿法焊接过程稳定性及熔滴过渡控制研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2019.
- DU Y P. Research underwater wet welding stability and metal transfer control[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [20] Jia C B, Zhang T, Maksimov S, 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.
- [21] Pessoa E, Liu S. The state of the art of underwater wet welding practice: part2[J]. Welding Journal, 2021, 100(5): 171-182.
- [22] Wang J, Liu Y, Feng J C, et al. Microstructure evolution of e40 steel weldments in ultrasonic-wave-assisted underwater FCAW[J]. Welding Journal, 2021, 100(3): 106-120.
- [23] Świerczynska A, Fydrych D, Rogalski G. Diffusible hydrogen management in underwater wet self-shielded flux cored arc welding[J]. Hydrogen Energy, 2017, 42(38): 1-9.
- [24] Vashishtha P, Wattal R, Pandey S, et al. Problems encountered in underwater welding and remedies—a review[J]. Materials Today, 2022, 64(3): 1433-1439.
- [25] Ibarra S, Liu S, Olson D L. Underwater Welding of Steels[C]//Welding Brazing and Soldering—ASM Materials Handbook Volume 6, ASM International, 1993: 1010-1015.

- [26] Zhao B, Chen J, Jia C, et al. Numerical analysis of molten pool behavior during underwater wet FCAW process [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 32: 538–552.
- [27] Omajene J, Martikainen J, Wu H, et al. Optimization of underwater wet welding process parameters using neural network [J]. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2014, 26(9): 26.
- [28] Wang J F, Sun Q J, Zhang S, et al. Characterization of the underwater welding arc bubble through a visual sensing method [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 251: 95–108.
- [29] Gguo N, Liu D, Gguo W, et al. Effect of Ni on microstructure and mechanical properties of underwater wet welding joint [J]. *Materials & Design*, 2015, 77(15): 25–31.
- [30] Wang J F, Sun Q J, Hou S J, et al. Bubble evolution in ultrasonic wave-assisted underwater wet FCAW Weld [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 181(5): 150–163.
- [31] Yang Q Y, Han Y F, Jia C B, et al. Impeding effect of bubbles on metal transfer in underwater wet FCAW [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45: 682–689.
- [32] Plessis J D, Toilt D M. Reducing diffusible hydrogen contents of shielded metal arc welds through addition of flux-oxidizing ingredients [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, 17: 50–56.
- [33] Li H L, Liu D, Song Y Y, et al. Microstructure and mechanical properties of underwater wet welded high-carbon-equivalent steel Q460 using austenitic consumables [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 149–157.
- [34] Jia C, Wu J, Han Y, et al. Underwater Pulse-Current FCAW-Part 1: Waveform and Process Features [J]. *Welding Journal*, 2020, 99(5): 135–145.
- [35] 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(1): 90–92.
- [36] Ma Q, Li L H, Liu S X, et al. Comparative evaluation of self-shielded flux-cored wires designed for high strength low alloy steel in underwater wet welding: Arc Stability, Slag Characteristics, and Joints' Quality [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(2): 1–14.
- [37] Klett J, Hecht V, Grunzel O, et al. Effect of the water depth on the hydrogen content in SMAW wet welded joints [J]. *SN Appl Sci*, 2020, 7(2): 1–14.
- [38] Chen H, Gguo N, Shi X H, et al. Effect of hydrostatic pressure on protective bubble characteristic and weld quality in underwater flux-cored wire wet welding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 259: 159–168.
- [39] Chen H, Guo N, Zhang X, et al. Effect of water flow on the microstructure, mechanical performance and cracking susceptibility of underwater wet welded Q235 and E40 steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 277: 1–13.
- [40] Santos V R, Monteiro M J, Rizzo F C, et al. Development of an Oxynitride Electrode for Wet Welding [J]. *Welding Journal*, 2012, 91(12): 319–328.
- [41] Labanowski J, Fydrych D. Underwater welding—A Review [J]. *Advances in Materials Science*, 2008, 17(8): 11–22.
- [42] Zhang X, Guo N, Luo W X, et al. A novel liquid-shielded welding solution for diffusible hydrogen content restriction and metal transfer controlling in underwater FCAW condition [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(11): 7362–7367.
- [43] Zhang X, Guo N, Ding Y, et al. A novel approach of ultra-low diffusible hydrogen welding wire for underwater wet flux-cored arc welding: a spontaneous barrier of molten slag [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 5669–5674.
- [44] Chen H, Guo N, Xu K X, et al. In-situ observations of melt degassing and hydrogen removal enhanced by ultrasonics in underwater wet welding [J]. *Materials & Design*, 2020, 188: 108482.
- [45] Zhang H T, Dai X Y, Feng J C, et al. Preliminary investigation on real-time induction heating-assisted underwater wet welding [J]. *Welding Journal*, 2015, 94: 8–15.
- [46] 胡乐亮. 外加中频热场辅助水下湿法焊接工艺研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2013.
- HU L L. Research on welding procedure of underwater-wet welding technology with trailing medium frequency induction heating [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [47] Labanowski J, Prokon-strzel czynska K, Rogalski G, et al. The effect of wet underwater welding on cold cracking susceptibility of duplex stainless steel [J]. *Advances in Materials Science*, 2016, 16(2): 68–77.
- [48] Zhang Y, Jia C B, Wang X J, et al. Investigation on the

- bubble dynamic behaviors and corresponding regulation method in underwater flux-cored arc welding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(7):1808-1817.
- [49] Tsai C L, Masubuchi K. Mechanisms of rapid cooling in underwater welding [J]. Applied Ocean Research, 1979, 2A(1):99-110.
- [50] Zhao B, Chen J, Wu C, et al. Numerical simulation of bubble and arc dynamics during underwater wet flux-cored arc welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59:167-185.
- [51] Oliverira F, Soares W R, Brancarense A. Study correlating the bubble phenomenon and electrical signals in underwater wet welding with covered electrodes [J]. Welding International, 2012, 9(5):363-371.
- [52] Mendonça C M, Bracarense A Q. Investigation of bubbles phenomenon in underwater wet welding with self-protected tubular wire [J]. Soldagem Inspeção, 2019, 24:1-14.
- [53] Feng J C, Wang J F, Sun Q J, et al. Investigation on dynamic behaviors of bubble evolution in underwater wet flux-cored arc welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 28(1):156-167.
- [54] Wang J F, Sun Q J, Liang Y L, et al. Analysis and improvement of underwater wet welding process stability with static mechanical constraint support[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34:238-250.
- [55] Guo N, Fu Y L, Feng J C, et al. Classification of metal transfer model in underwater wet welding[J]. Welding Journal, 2016, 95:133-140.
- [56] Jia C B, Zhang Y, Zhao B, et al. Visual sensing of the physical process during underwater wet FCAW [J]. Welding Journal, 2016.
- [57] 张勇. 水下湿法药芯焊丝焊接过程熔滴过渡、气泡行为以及焊缝成型的研究[D]. 山东:山东大学, 2018.
- ZHANG Y. The investigation of metal transfer, bubble behavior and bead formation during underwater wet FCAW[D]. Shandong:Shandong University, 2018.
- [58] Wang J F, Sun Q J, Hou S J, et al. Dynamic control of current and voltage waveforms and droplet transfer for ultrasonic-wave-assisted underwater wet welding [J]. Materials & Design, 2019, 181:108051.
- [59] Chen H, Guo N, Zhang Z H, et al. A novel strategy for metal transfer controlling in underwater wet welding using ultrasonic-assisted method [J]. Materials Letters, 2020, 270(1):127692.
- [60] Wu J, Han Y, Jia C, et al. Underwater Pulse-Current FCAW Part 2: Bubble Behaviors and Waveform Optimization[J]. Welding Journal, 2020, 99(12):303-311.
- [61] 孟德宇. 电磁辅助电弧直接成形数值模拟[D]. 湖北:华中科技大学, 2012.
- Meng D Y. Numerical simulation of electromagnetic assisted arc direct forming[D]. Hubei:Huazhong Uiniversity of Science and Technology, 2012.
- [62] 贾存锋. 激光辅助水下高压MIG焊接熔滴过渡控制技术[D]. 北京:北京工业大学, 2014.
- Jia C F. Research on technology of laser enhanced metal transfer control in underwater hyperbaric MIG welding [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
- [63] Chen Q H, Ge H L, Yang C L, et al. Study on pores in ultrasonic-assisted TIG weld of aluminum alloy [J]. Metals, 2017, 7(2):53.
- [64] Wang Y J, Yu C, Lu H, et al. Research status and future perspectives on ultrasonic arc welding technique [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58:936-954.
- [65] Xu C S, Guo N, Zhang X, et al. In situ X-ray imaging of melt pool dynamics in underwater arc welding [J]. Materials & Design, 2019, 179(5):107899.
- [66] Sun Q J, Cheng W Q, Liu Y B, et al. Microstructure and mechanical properties of ultrasonic assisted underwater wet welding joints [J]. Materials & Design, 2016, 103(5):63-70.
- [67] Wang J F, Sun Q J, Wu L J, et al. Effect of ultrasonic vibration on microstructural evolution and mechanical properties of underwater wet welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 246:185-197.
- [68] Wang J F, Sun Q J, Ma J K, et al. Investigation of acoustic radiator affecting bubble-acoustic interaction in ultrasonic wave-assisted UWW at shallow water[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37:563-577.
- [69] Chen J, Wen Z, Jia C B, et al. The mechanism of underwater wet flux-cored arc welding assisted by ultrasonic frequency pulse high-current [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 304:117567.