

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.002

水下焊接复合物理场模拟综述

陈嘉铭^a, 郑震旦^a, 于鹏^a, 王海杰^a, 田鹏飞^a, 张奥运^a, 程方杰^{a,b}, 武少杰^{a,b}

(天津大学 a. 材料科学与工程学院; b. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350)

摘 要:随着我国海洋事业向着更深更远的领域发展,水下焊接技术在海洋资源开发、船舶工程、水利工程、钢结构的连接和服役钢结构修复等领域发挥着举足轻重的作用。由于受到水下复杂环境的限制,采用传统水下试验的方法存在成本高、工作量大、效率低等问题。因此,水下焊接有限元模拟应运而生,并受到了国内众多研究人员的青睐。针对水下焊接物理场模拟技术,阐述从单一物理场模拟到双复合物理场耦合模拟最后到多复合物理场模拟的国内外研究现状,梳理从单一物理场到多复合物理场模拟的相关方法,并对建立多复合物理场模拟模型发展趋势及必要性进行展望。

关键词:海洋事业;水下焊接;多复合物理场;有限元模拟

中图分类号:TG444 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)04-0009-08

Review on Underwater Welding Multi-coupled Physical Field Simulation

CHEN Jiaming^a, ZHENG Zhendan^a, YU Peng^a, WANG Haijie^a, TIAN Pengfei^a,ZHANG Aoyun^a, CHENG Fangjie^{a,b}, WU Shaojie^{a,b}(a. School of Materials Science and Engineering; b. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology,
Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Despite that underwater welding technology has played a pivotal role in various fields such as marine resource development, ship engineering, hydraulic engineering, steel structure connections and the repair of in-service steel structures in the recent advancement of China's marine endeavors into deeper and more distant domains, it is challenged with high costs, extensive requirements and low efficiency constrained by complex underwater environments and traditional underwater testing methods. Thus finite element simulation of underwater welding having emerged as a favored approach among researchers. This paper, focusing on the simulation technology of underwater welding physical fields, summarizes the domestic and international research status from single physical field simulations to dual coupled physical field simulations and finally to multi-coupled physical field simulations, sorts out the relevant methods from single to multi-coupled physical field simulations, and envisions the development trends and necessity of establishing multi-coupled physical field simulation models.

Keywords: marine endeavor; underwater welding; multi-coupled physical field; finite element simulation

0 引言

近年来,随着我国海洋事业向着更深更远的领域发展,水下焊接技术在海洋资源开发、船舶工程、水利工程、钢结构的连接和服役钢结构的修复等领域发挥着举足轻重的作用^[1-4],具体如图 1 所示。与传统陆上焊接相比,水下焊接的环境更加恶劣,受到水介质导热快、水压大、水下能见度低等服役环境的限制,故对材料和焊接工艺有着极高的要求^[5-7]。为了节约经济成本、减少水下焊接试验工作量和观测分析水下焊接过程中无法

直接观察的多物理场耦合过程^[8-9],具有低成本、高效率、原位观测优势的水下焊接模拟方法被提出^[10-11]。水下焊接模拟可真实地还原水下焊接实际工况,使人们对于水下焊接过程中的气体流动、电弧形态、温度变化、熔池流动等现象有了直观性的认识,并以此来指导水下焊接工艺的开发和优化^[12-14]。本文总结了水下焊接模拟的国内外研究现状,梳理了从单一物理场到复合物理场模拟的相关方法,并对建立多复合物理场模拟模型发展趋势进行了展望。

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3407701)

第一作者简介:陈嘉铭(2001—),男,河北邢台人,硕士,研究方向为焊接有限元模拟仿真,2023208060@tju.edu.cn。

通信作者简介:武少杰(1989—),男,湖北十堰人,副教授,研究方向为焊接过程传感、焊接机器人、先进焊接工艺,shaojie@tju.edu.cn。

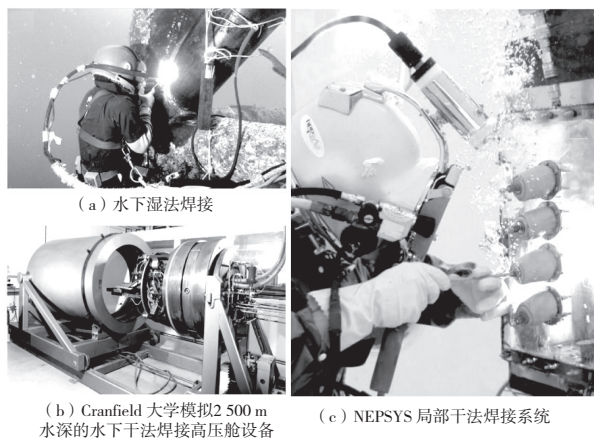


图1 水下焊接相关工艺

1 模拟技术手段

水下焊接模拟过程主要通过有限元模拟计算软件 ABAQUS、ANSYS、Sysweld、Vector Fields 等来实现对温度场、应力场、流场、电场、磁场等的模拟计算。为了充分地利用软件的强大计算功能, Sysweld 和 ABAQUS 两种软件主要针对于温度场和应力场的非线性模拟计算, ANSYS 中的 Fluent 模块主要针对于流场的模拟计算, Vector Fields 中的 Scala 模块主要用于模拟电子束、粒子加速器、X 射线的产生、辉光放电、带点粒子在各种媒介中的传递等^[15]; 还有专门用于分析焊接现象的软件, 如 Hearts 和 Quick Welder 等^[16]。

由于水下焊接工况极为复杂, 通常在尽量避免影响计算结果的前提下, 对模型进行适当的假设, 来保证模型的可计算性。一般对于流体计算来说认为熔池中的流体流动是不可压缩的, 并且遵循牛顿流体行为。同时流动模式是层流的, 流体遵循 Boussinesq 近似^[17]; 对于温度场和应力场来说, 一般认为材料具有各向同性, 即在不同的方向具有相同的物理性质。如果涉及相变(如熔化或凝固), 假设相变过程中的潜热和体积变化可以通过特定的模型(如焓法)来处理^[18]。对于电磁场的模拟, 一般认为焊接电弧是稳定的、轴对称的, 认为电弧等离子体流是不可压缩流体, 且流动处于层流状态。认为电弧等离子体处于局域热力学平衡状态(LTE)。认为电弧等离子体是光学薄的, 即辐射的重新吸收与总的辐射损失相比可以忽略不计。认为由于电极和母材表面的电弧区比较小, 所以计算区域不包括电极和母材表面^[19-20]。

2 单一物理场模拟

早期对于水下焊接的模拟计算主要针对单一物理场, 具体集中在对熔池温度场、组织性能预测、设备和工艺优化等实际水下焊接过程中不容易观察且亟待解决的重要问题的探究, 从而指导后续实验, 实现高效水下焊接。

2.1 温度场模拟

运用有限元法对焊接温度场进行数值模拟最早开始于 20 世纪 70 年代^[21]。水下焊接过程中的温度场模拟同样起步较早。1983 年, 上海交通大学的陈楚等^[22]较早地对水下焊接温度场有限元模拟展开了研究, 通过数值模拟的方法对 6 mm 钢板的非线性焊接温度场进行了分析, 提出局部干法水下焊接温度场计算模型, 将局部干法水下焊接模型分为电弧加热区、气相冷却区和水冷区。1986 年, 上海交通大学的李传曦^[23]从理论的角度介绍了水下焊接过程的热传导方程以及有限元模拟求解温度场的途径, 并且对利用有限元求解水下焊接温度场方法的实用性进行了肯定。20 世纪 90 年代, HAMANN 等^[24]利用 ABAQUS 模拟计算软件, 建立了适用于等离子-Mig 水下焊接模型, 并对其温度场进行计算, 对水下焊接过程中表面传热对焊接温度场的影响进行了探究。到了 21 世纪, Liu 等^[25]通过 ANSYS 有限元模拟软件, 建立了水下焊接三维温度场模型, 提出了采用双椭圆高斯复合热源模型, 分析了影响水下焊接温度场的几个重要因素, 最终通过实验验证了有限元模型与实验匹配程度良好。山东大学的赵博等^[26]从陆上焊接温度场的有限元法数值模拟入手, 建立适用于低碳钢陆上常规熔化极气体保护电弧焊 GMAW 的电弧热源分布模式和作用模型, 并适当考虑熔滴热焓与动量在熔池中的分布影响, 获得不同工艺条件下焊缝的几何参数、热影响区几何参数、焊接热循环等的基础数据, 并通过实验验证其准确性。

通过对温度场模拟, 还可以实现对于焊接接头组织和性能的预测。李航、柴硕^[27-28]在实验的基础上, 建立了水下湿法堆焊有限元模型, 模拟仿真焊接过程中的温度场, 结合焊接连续冷却组织转变图(CCT 图)实现了对焊后组织和性能的成功预测, 得到了冷却组织维氏硬度随 $t_{8/5}$ 的变化趋势图, 具体如图 2 所示(本刊为黑白印刷, 如有疑问请咨询作者)。

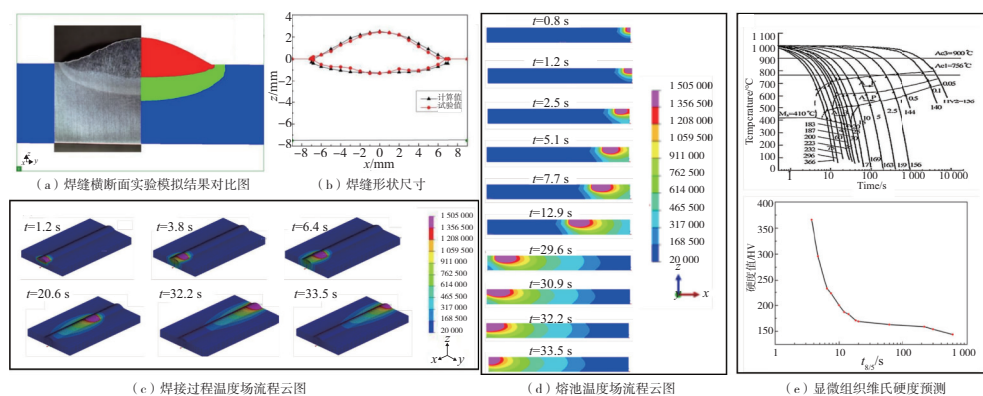


图2 水下焊接温度场模拟图

2.2 流场模拟

水下焊接的单一物理场模拟不仅限于水下焊接过程温度场的计算,还有干法或者局部干法水下焊接的关键部件排水罩排水过程流场的相关计算,以达到结构优化目的。李兰等^[29]利用 Fluent 有限元模拟软件,采用多相流模型(VOF),对水下焊接中圆形排水罩的排水过程进行流场分析,建立了具有不同进气方式和排水方式的圆形排水罩模型,如图 3(a)所示。分析对比不同进气方式和排出方式下罩内相的分布和焊接区域的流体状态。并通过与实验结果对比,验证了模拟的正确性。最终得出均布进气口和环形出口排水效果更好。贾文卓等^[30]同样利用 Fluent 有限元模拟软件对排水罩的径向进气、切向进气和带镇静气室的

的环向进气进行数值模拟,最终得到环向进气且有镇静气室的排水罩的仿真结果合理性最高,并进行了试验验证。

通过对排水罩体的流场模拟,还可以将该结果集成到焊接机器人,实现水下焊接向智能化、高效化发展。黄军芬等^[31]通过 Fluent 有限元模拟软件对水下局部干法排水罩内气体和焊接过程中的保护气体的流动情况以及二者之间的相互作用进行流场模拟如图 3(b)所示,在得到使得焊接电弧基本不受水气流影响的模拟结果基础上,将此排水罩体模拟仿真结果运用到焊接机器人身上,将流场模拟与智能化联动,保证水下焊接质量和效率。

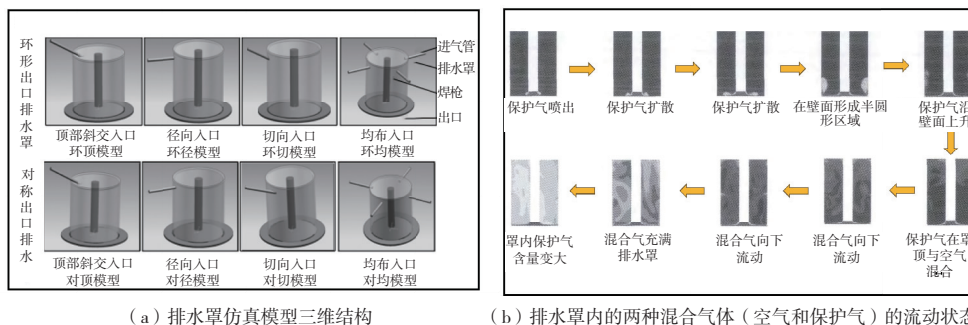


图3 水下焊接局部干法排水罩体流场模拟图

2.3 电场模拟

对于传统的陆上焊接来说,电弧仿真的研究主要依赖于磁流体动力学(MHD)方法。这种方法通过结合流体守恒控制方程和麦克斯韦方程组,能够有效模拟等离子体电弧的流动和传热过程。研究者通常基于这些方程构建自由电弧区域的二维模型,并通过耦合迭代计算,最终获得电弧的电流密度、速度、温度及压力等参数的分布情

况。然而,在水下焊接过程中,电弧的放电机制因液体电介质的击穿机制与气体环境存在显著差异,导致传统的磁流体动力学方法难以有效模拟水下焊接电弧现象。

为了实现水下焊接电弧仿真过程,华东交通大学的李志刚团队针对 TIG 焊水下湿法焊接过程中的电弧行为模拟仿真进行了详细研究^[32]。该团队基于粒子物理学方法,提出了一种液体介质

中的电弧仿真的方法,从粒子物理学和静电场两方面对水下电弧带电粒子的物理行为进行研究。其对比了空气环境下水下电弧电子束轨迹和速度图。模拟结果表明:电弧的自身磁场会对电弧轨迹有重要的影响,特别是在水下焊接中,电子束的轨迹有明显的收缩,电弧形状由“钟罩形”变成“哑铃形”,如图4所示。

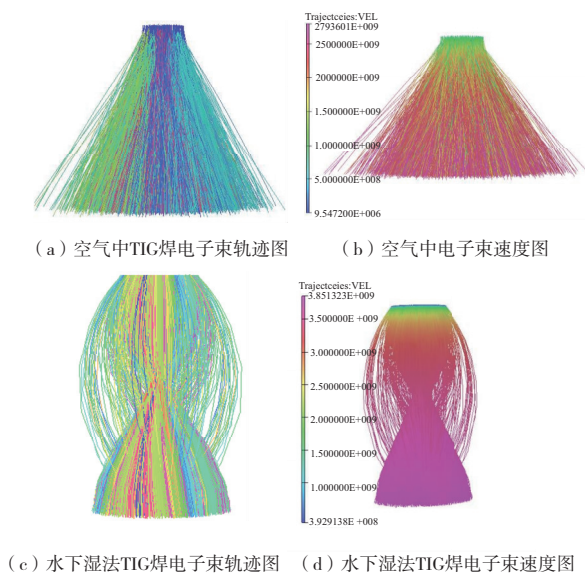


图4 TIG焊电子束电场模拟结果

3 双复合物理场模拟

在前面的论述中,虽然水下焊接单独的温度场模拟和流场模拟能够解决一些水下焊接的具体实际问题。但是,由于水下焊接过程极其复杂,采用单一物理场进行模拟过程中需要对很多实际物理过程进行简化,而很多关键信息可能被忽略。随着水下焊接技术的不断发展,为了更加接近水下焊接的实际过程,同时得到更多关于水下焊接电弧、熔池等关键几何参数信息,人们将温度场、应力场、流场、电场、磁场等多个单一物理场进行组合实现双复合模拟计算。

复合物理场模拟模型中,温度场和应力场构成的热-力耦合有限元模拟计算较为常见,国内外学者针对不同的水下焊接工艺进行热力耦合模拟,对其中的温度场变化和残余应力变化和分布进行提取分析,并以此为基础指导水下焊接实验。

公认的较早研究水下焊接热力耦合模拟计算的是在1992年开普敦大学的RONDA等^[33],研究中将水下焊接问题表述为热弹性体的热自由边界

问题和热机械接触问题。热自由边界问题的讨论考虑了相变的影响。接触问题则用于确定焊缝与焊件之间的相互作用以及焊件内部的残余应力,最终完成焊件的温度场和残余应力场模拟计算。

德国的LINDHORST等^[34]在研究等离子体-熔化极气体保护焊水下焊接对裂纹张开位移影响过程中,建立了平板对接焊三维实体模型,基于电弧特征和水的不同温度下的热传导系数,利用有限元模拟的方法(FEM)对静态温度场和焊接残余应力进行了模拟计算分析。

针对常规的熔化极气体保护焊(GMAW)水下焊接过程,充分考虑水下焊接与传统陆上焊接相比压力大和焊件表面对流换热系数高的特点,利用Sysweld软件模拟了水下电弧形态和能量分布的变化以及水下散热条件改变而对试件应力与变形的影响,实现了水下湿法焊接的热-力耦合模拟。贾剑平等^[35]利用ANSYS有限元模拟软件对MIG焊接Q235-A中厚板T型坡口进行模拟计算,对水下局部干法的焊接和冷却过程进行了三维动态模拟,并且实现了APDL自主编程,最终得到了水下局部干法的焊接试样温度场变化规律和应力场变化及分布规律(图5(a))。周飞鸿等^[36]探究921A舰船钢高压干法水下激光填丝熔覆修复的温度场、应力场以及应变场分布规律。通过Sysweld软件进行了常压及0.3 MPa压力环境的数值模拟,结果显示:在不同压力条件下,试件的温度场分布呈现出典型的纺锤形特征,且高压环境下实现试件熔化所需的激光功率显著高于常压条件;高压与常压状态下的等效应力及各向应力均未达到921A舰船钢的屈服极限;相较于常压环境,高压条件下试件的横向、纵向及轴向变形量略有增加,其中轴向变形的差异尤为显著(图5(b))。

近年来,出现了一种新型固相连接技术——摩擦叠焊。有研究表明,摩擦叠焊技术在干湿环境条件下都能够获得较好的连接质量。我国也已成功开发出了相应的水下摩擦叠焊设备^[37]。高辉^[38]提出利用摩擦叠焊进行深水潜水修复,并通过单元成型的理论进行典型的热-力耦合数值模拟,采用MSC.MARC软件更新的Lagrange处理热力耦合计算,结果表明:摩擦叠焊单元成型焊接过程中各焊接工艺参数对焊接情况的影响规律一般不随材料的变化而变化,只是不同材料的热物性能和力学性能不同导致各焊接工艺参数的数值大小有所差异(图5(c))。

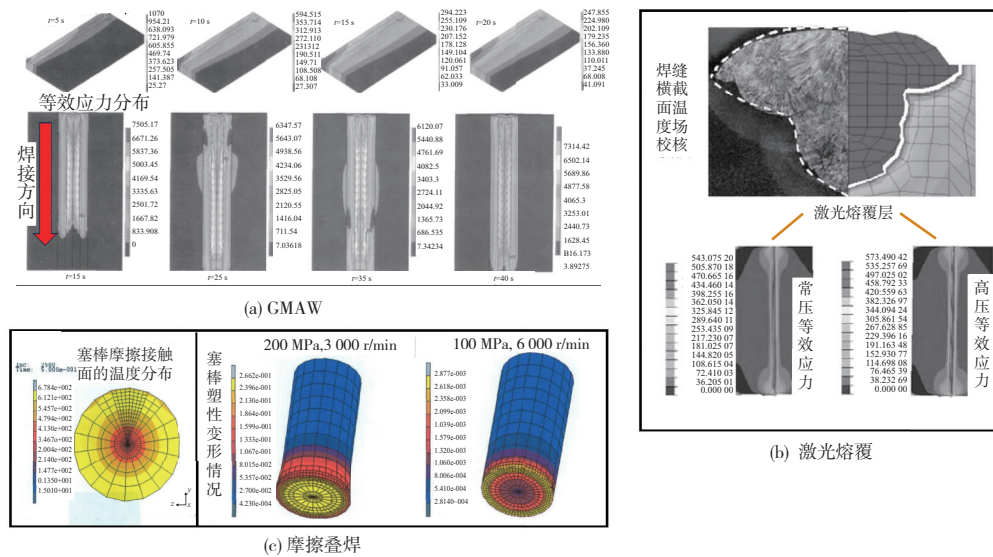


图5 不同焊接方法下的水下焊接热-力耦合模拟

4 多复合物理场模拟

前面提到,对于水下焊接单一物理场模拟和双复合物理场模拟的研究虽然已经完成了很多水下焊接电弧和熔池的模拟,也解决了很多实际问题,但是由于水下焊接过程,尤其是水下湿法焊接太过复杂,只借助1—2个物理场需要合理假设太多条件,这也就导致了很难完全准确地模拟出水下焊接实际过程。因此,在双复合物理场耦合模拟的基础上,流场、温度场、电场、磁场等多个物理场组成的多复合物理场耦合模拟应运而生,进一步帮助解决更复杂的水下焊接过程中关于熔池和电弧的问题。

近几年来,山东大学的武传松、贾传宝、陈姬团队主要针对水下湿法药芯焊丝电弧焊(W-FCAW)展开大量详细的研究^[39-42]。在此之前,对于水下焊接的熔池和电弧行为模拟中,仅针对熔滴、电弧、气泡、熔池中的一个或两个对象进行研究,而该团队考虑了包含温度场、流场、电磁场等在内的复合物理场,开发了瞬态三维计算流体动力学(CFD)模型。如图6所示。这些模型涵盖了熔渣和水下环境对焊接熔池内热量和质量传递的影响。研究讨论了熔滴冲击、重力、电磁力、表面张力和界面张力在湿环境下对焊接熔池演变的作用,并与传统药芯焊丝电弧焊(C-FCAW)进行了比较。结果表明,在水下焊接过程中,焊接熔池的纵向截面上存在显著的涡流,这种涡流将大量热

量传递到熔池底部。由于快速水冷效应,水下焊接过程中熔池表面的流体流动区域比传统焊接过程更为受限。在不同焊接参数下,预测的焊缝形状与实验结果吻合良好。该研究为水下湿法药芯焊丝电弧焊的工艺优化提供了理论指导,揭示了焊接过程中电弧、熔滴和熔池的动态行为,有助于提高水下焊接的质量和稳定性。

相对于药芯焊丝电弧焊,激光焊接在水下湿法焊接过程中也同样是一种常用的焊接方法。电子科技大学的KE等^[43]对水下湿法激光焊接(UWLW)过程中的热物理机制展开了研究。在研究中创新性地提出了一种热多相流模型,用于研究在浅水柱深度(水深 ≤ 4 mm)下UWLW过程中涉及的热传递、流体动力学和相变,并且提出了一个考虑激光能量在水和金属中分布的双锥体体积热源模型。考虑了重力、表面张力和水/金属蒸汽反冲压力等驱动力。结果表明:在UWLW过程中,激光加热形成了一个水孔,在熔池上方形成了一个局部干燥区域(LDR)。LDR将水与熔池隔离,保护了激光与金属的相互作用,从而使焊接环境类似于空气中的激光焊接(IALW),这是与其他焊接方法(FCAW、GMAW)进行水下焊接过程有较大差异的地方,如图7所示。由于水的蒸发,UWLW过程中熔池的上后部和侧面的冷却速率比IALW情况更高,导致更高的温度梯度和更小的熔池尺寸。这对于研究UWLW的复杂过程有重要作用。

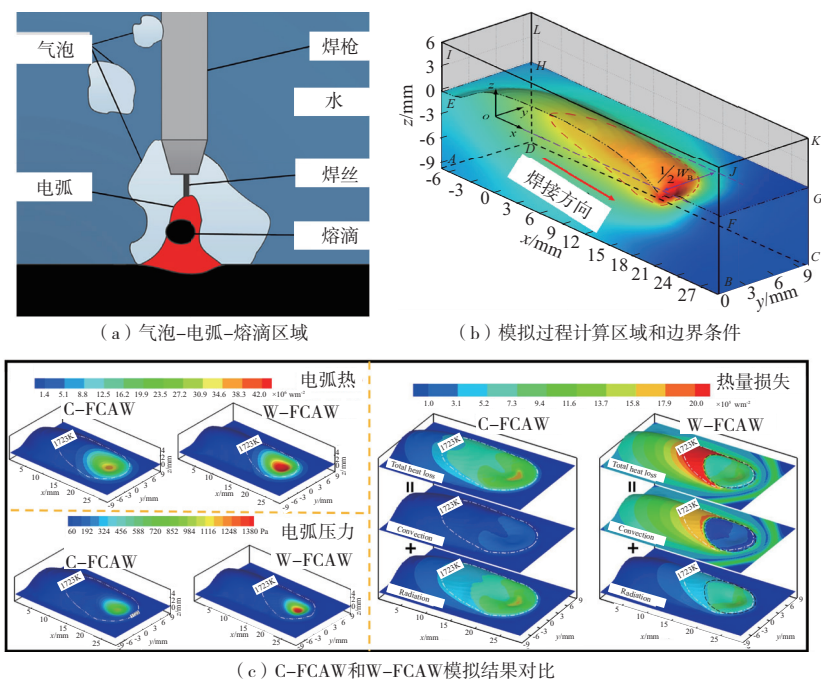


图6 W-FCAW熔池多复合物理场耦合模拟

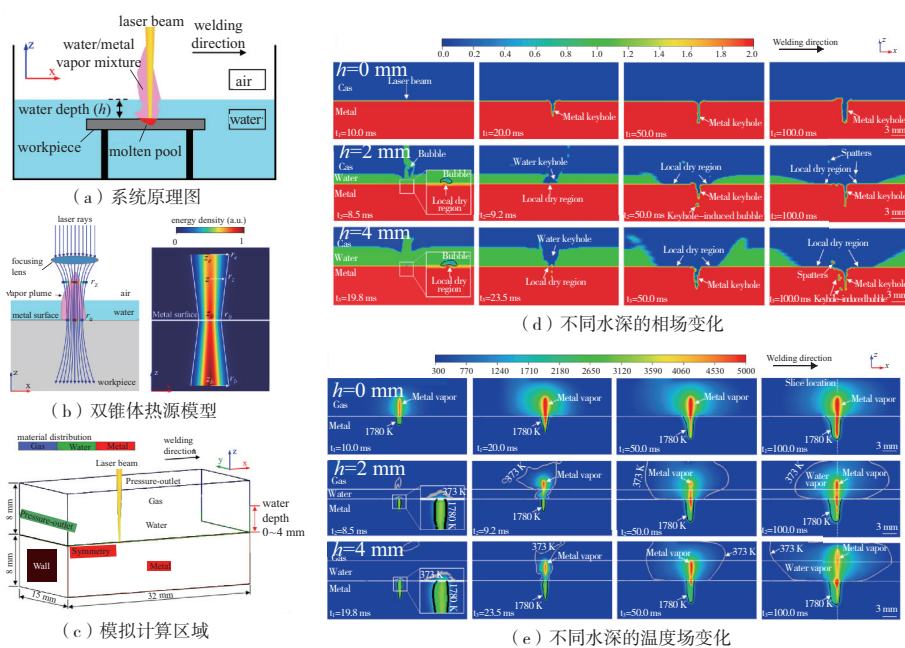


图7 UWLW熔池多复合物理场耦合模拟

5 结语

针对水下焊接物理场模拟,本文系统总结了从单一物理场模拟到多复合物理场模拟的研究进展,对比分析了多复合物理场模拟对水下焊接领域的作用和优势,并强调了构建多复合物理场模拟模型的必要性。未来主要发展趋势如下。

1) 多复合物理场模拟揭示水深对电弧稳定性

的影响机制。虽然已经有研究对于水深对电弧稳定性的影响展开探究,但研究范围主要局限于浅水区域,模拟结果具有一定的局限性。尤其是对于焊接电弧而言,水深对于电弧稳定性影响很大。未来研究中应该结合具体工况,构建更加完备的电弧-熔池-熔滴-气泡多复合物理场模型,深入揭示水深变化对于电弧稳定性的内在影响规律,特别是电弧等离子体行为、热传导及流体动力学

耦合机制。

2)多复合物理场模拟解析水下焊接中氢环境对焊接接头的微观作用机制。水下焊接主要应用于海洋工程领域,而海洋环境与传统水环境的显著差异在于富氢元素。研究表明:焊接接头淬硬组织、残余氢和拘束应力共同作用的结果导致氢致裂纹的产生,而焊接氢致裂纹是低合金高强度钢焊接接头中最常见的焊接缺陷之一,严重影响结构件的服役性能。尽管已经有部分研究对氢的扩散和聚集进行了初步探讨,但氢环境对于焊接过程的影响以及接头的影响机制仍不明确,未来通过温度场—流场—相场—应力场—电场等多复合物理场模拟,系统解析水下焊接过程中氢环境对焊接接头的微观组织演变、氢扩散动力学及应力分布影响规律,为优化焊接工艺提供理论依据。

3)多复合物理场模拟揭示水下复合焊接的物理机制与规律。当前对于水下焊接模拟多集中于单一焊接工艺,然而每种焊接工艺都存在固有局限性,如激光焊(LBW)热源能量密度过高导致接头温度梯度过大,钨极惰性气体保护焊(GTAW)热输入不足导致效率低下,熔化极气体保护焊(GMAW)由于熔滴过渡不稳定引发飞溅等问题。为此,水下复合焊接工艺开发成为必然趋势。然而由于水下环境的复杂性,对于水下复合焊接工艺的规律和机制尚未明晰。未来应通过多复合物理场模拟,深入探究复合焊接过程中,熔池动力学、电弧行为及热-力耦合效应等的内在规律,为工艺的开发和优化过程提供理论指导,从而提升水下焊接效率与接头性能。

参考文献:

- [1] 陈雯,窦义粟. 世界海洋工程产业发展现状分析[J]. 中国水运,2007,7(8):99-200.
- [2] 冯其斌. 焊接技术在我国石油工程建设中的应用[J]. 化学工程与装备,2021(10):65-66.
- [3] 寇荣魁. LNG 储罐 304L 不锈钢水下焊接修复[J]. 山东石油化工学院学报,2024,38(4):80-84.
- [4] ERSOY E. Recent trends and development of underwater welding[J]. International Journal of Engineering Science and Application, 4(1):36-44.
- [5] 张洪涛,钟诗胜,冯吉才. 水下焊接技术现状及发展[J]. 焊接,2011(10):18-22,27,70.
- [6] 唐德渝,龙斌,郑树森. 海洋石油工程水下焊接技术的现状及发展[J]. 金属加工(热加工),2009(4):24-28.
- [7] 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.
- [8] GAO W B, WANG D P, CHENG F J, et al. Microstructural and mechanical performance of underwater wet welded S355 steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 333-340.
- [9] 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.
- [10] 王中辉,李冬雪. 焊接数值模拟技术的发展现状[J]. 焊管,2010,33(6):28-31.
- [11] 杜乃在. 计算机仿真在焊接学科中的应用[J]. 焊接技术,1999,28(1):42-43.
- [12] 严春妍,顾正家,聂榕圻,等. X80 管线钢水下湿法多道焊残余应力分析[J]. 焊接学报,2024,45(3):15-21,130.
- [13] 唐德渝,龙斌,郑树森. 海洋石油工程水下焊接技术的现状及发展[J]. 金属加工(热加工),2009(4):24-28.
- [14] 欧阳旭. 水下在役焊接修复数值模拟分析[D]. 成都:西南石油大学,2015.
- [15] 李志刚,黄卫,李洋,等. 水下湿法焊接直流电弧放电的仿真研究[J]. 电焊机,2019,49(9):119-123.
- [16] 张明贤. DE-GMAW 焊接温度场与热变形的有限元分析[D]. 济南:山东大学,2006.
- [17] ZHAO B, CHEN J, JIA C B, et al. Numerical analysis of molten pool behavior during underwater wet FCAW process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 538-552.
- [18] 赵博. 水下湿法焊接温度场和应力变形的有限元分析[D]. 济南:山东大学,2012.
- [19] 曹军,李连波,赵翠华,等. 水下焊接过程数值模拟研究现状与发展趋势[J]. 焊接技术,2015,44(3):1-5.
- [20] 李志刚,张华,贾剑平. 基于旋转电弧传感器的水下焊接高压电弧仿真计算[J]. 焊接学报,2010,31(7):17-21,113-114.
- [21] 邢长健. 水下湿法药芯焊丝焊接熔滴过渡过程的数值模拟[D]. 济南:山东大学,2019.
- [22] 陈楚,汪建华,杨洪庆. 水下焊接冷却特性的有限元分析[J]. 海洋工程,1983,1(4):34-38.
- [23] 李传曦. 水下焊接温度场的有限元法[J]. 海洋工程,1986,4(2):64-72.
- [24] HAMANN R, MAHREHOLTZ O. On the influence of the surface heat transfer coefficient on wet underwater welds[C]. Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers, Osaka, Japan, 1994: 112-119.
- [25] LIU X W, WANG G R, SHI Y H, et al. Finite element simulation of three-dimensional temperature field in underwater welding[J]. China Welding, 2007, 16(2): 59-65.
- [26] 赵博,武传松. 水下湿法焊接温度场的数值模拟[C]//第十六次全国焊接学术会议论文摘要集.

- 镇江:江苏科技大学,2011:754-760.
- [27] 李航. 水下湿法焊接过程温度场模拟和冶金行为分析[D]. 天津:天津大学,2012.
- [28] 柴硕. 水下湿法多道焊接热循环特征分析及冶金行为预测[D]. 天津:天津大学,2014.
- [29] 李兰,薛龙,黄军芬,等. 水下局部干法焊接圆形排水罩的流体仿真分析[J]. 焊接学报,2016,37(2):43-46,107,131.
- [30] 贾文卓,朱加雷,高辉,等. 水下局部干式焊接排水气罩研究[J]. 北京石油化工学院学报,2010,18(4):47-50.
- [31] 黄军芬,黄继强,孙亚玲,等. 水下局部干法焊接中排水罩内的流体状态分析[J]. 上海交通大学学报,2016,50(10):1622-1626.
- [32] 王健. 基于粒子物理学的水下湿法旋转电弧模拟仿真[D]. 南昌:华东交通大学,2015.
- [33] RONDA J, MAHREHOLTZ O, HAMANN R. Thermomechanical simulation of underwater welding processes[J]. Archive of Applied Mechanics, 1992, 62(1):15-27.
- [34] LINDHORST L, MAHREHOLTZ O. On the influence of wet underwater welding on CTOD - δ_5 [J]. International Journal of Fracture, 1999, 97(1):263-277.
- [35] 贾剑平,陈建平,刘云龙,等. 水下局部干法T型坡口焊接过程的有限元分析[J]. 热加工工艺,2013,42(1):190-192,195.
- [36] 周飞鸿,朱加雷,寇荣魁,等. 921A 舰船钢高压干法水下激光熔覆数值模拟[J]. 应用激光,2023,43(10):22-31.
- [37] 陈家庆,焦向东,邱宗义,等. 摩擦叠焊——一种新的固相连接技术[J]. 焊接技术,2007,36(1):1-5.
- [38] 高辉. 摩擦叠焊试验装置及焊接工艺研究[D]. 北京:北京化工大学,2010.
- [39] ZHAO B, CHEN J, WU C S, 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.
- [40] 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.
- [41] XU S C, HAN Y F, JIA C B, et al. Numerical modeling of coupled arc plasma, metal transfer and molten pool evolution for underwater flux-cored arc welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 123(7):2605-2622.
- [42] CUI X F, CHEN J, ZHENG T, et al. Experimental and simulation research on the dynamic behavior of arc and bubble in ultrasonic frequency pulse current-assisted underwater wet flux cored arc welding [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 242:126853.
- [43] KE W C, LIU Y, TESHOME F B, et al. Numerical study on multiphase evolution and molten pool dynamics of underwater wet laser welding in shallow water environment [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 220:124976.

收稿日期:2025-04-02

(上接第8页)

- [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. 高气压环境下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,2014,35(7):96-100,118.
- [36] 李凯,高洪明,李海超,等. 高压干法GMAW熔滴排斥过渡形成机理[J]. 焊接学报,2016,37(7):35-38.
- [37] 童敏,狄国梅,龙国梁,等. 多源信息融合技术在方形箱体焊接质量检测中的应用[J]. 现代制造技术与装备,2024,60(9):105-107.
- [38] 张为民,钟碧良. 基于最小二乘支持向量机的船舶水下焊接质量在线监测[J]. 中国造船,2009,50(1):117-121.
- [39] ZHANG Z F, CHEN S B. Real-time seam penetration identification in arc welding based on fusion of sound, voltage and spectrum signals [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017, 28(1):207-218.
- [40] 张志芬. 基于多信息融合的铝合金脉冲GTAW过程焊接缺陷特征提取研究[D]. 上海:上海交通大学,2015.
- [41] 刘先森. 基于多信息融合的窄间隙焊缝熔合质量监测及识别[D]. 天津:天津工业大学,2023.

收稿日期:2025-04-02