

计算机模拟及仿真技术在水下焊接中的应用研究现状

张琳琳 李海新 杨振林 殷子强

(山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001)

摘要 随着计算机技术的快速发展,计算机模拟及仿真技术得到广泛应用,成为研究焊接过程的一种重要手段。结合水下焊接和计算机模拟及仿真技术的发展情况,介绍了计算机模拟及仿真技术在水下焊接中的应用研究现状,重点论述了有限差分法、有限元分析法和有限体积法在水下焊接中的应用,并对计算机模拟及仿真技术在研究过程中的模拟方法、原理、模型建立及解析方法进行了介绍,提出了这一研究领域目前所存在的问题和今后的发展方向。

关键词: 计算机模拟 仿真技术 水下焊接

中图分类号: TG422

0 序 言

随着海洋资源的大力开发利用,对海洋工程的结构建设提出了更高的要求,而水下焊接技术是制造海洋工程结构必不可少的手段。水下焊接质量的好坏直接决定了海洋工程的可靠性。由于水下焊接存在水下压力大、能见度差、操作困难、焊接质量难以保证等问题^[1],吸引了大量的研究者,也取得了很多有意义的研究成果。

计算机模拟及仿真技术的出现及发展,使得焊接技术朝着“理论分析→数值模拟(仿真)→焊接生产”的模式发展,大大减少了焊接时在实际物理模型上的安装、调试、试验等方面的工作量,同时缩短了工作时间,降低了生产成本。近年来,焊接数值模拟技术发展迅速,主要致力于焊接温度场、电场、应力应变场的模拟,焊接接头组织、结构、性能的模拟等,还可实现一系列特种焊接的模拟,达到优化焊接工艺,消除焊接缺陷的目的^[2]。此外,计算机仿真技术也发展迅速,在焊接设备的研制、焊接工艺的制定和焊接控制系统的改进方面都得到应用^[3]。尽管计算机模拟及仿真技术在焊接中的应用发展迅速,但是在水下焊接中的研究还比较

滞后。此外水下焊接时焊接难度大,因此更加需要采用计算机模拟及仿真技术进行辅助指导,提前发现水下焊接过程中存在的问题,优化工艺,避免焊接缺陷的出现。文中对计算机模拟及仿真技术在水下焊接中的应用研究现状进行综述分析,并提出目前这一研究领域所存在的主要问题和今后的发展方向。

1 计算机模拟技术在水下焊接中的应用现状

水下焊接时,焊缝金属及热影响区的冷却速度比空气中焊接快,过快的冷却速度除了影响焊缝及热影响区的微观组织,导致焊缝中产生气孔外,还会导致焊件产生变形和应力问题^[4],这些均对接头性能产生不利影响。采用数值模拟的方法分析水下焊接过程中焊件的温度分布及应力应变,对于提出应对措施,改善水下焊接质量具有重要意义。历年来,对于空气中的焊接,研究者大都采用有限差分法、有限元分析法和有限体积法进行研究^[5],目前这些方法在水下焊接中也得到应用。

1.1 有限差分法

有限差分法是计算机模拟计算中最经典的方法,常用于焊接熔池中流体和温度场的耦合数值模拟和热传导计算等,目前在水下焊接中主要用于求解热传导方程,分析冷却过程特性及其对焊缝和热影响区显微组织、性能的影响规律。

Fukuoka 等人^[6]采用试验和三维有限差分数值方法对比分析了水下湿法焊接和传统空气中焊接的冷却过程特性,得出水下焊接时冷却速率并不是稳定增加

收稿日期: 2017-02-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51505267, 51305245); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2014EEP016); 山东省科学院青年基金资助项目(2013QN043); 青岛市应用基础研究计划资助项目(15-9-1-53-JCH)。

的,板厚和焊接速度的增加对其影响也较小。此外,由于水下湿法焊接时冷却速度的影响,焊缝金属周围和热影响区的硬度是空气中焊接所得焊缝的两倍。Dill^[7]采用三维 Crank - Nicholson 有限差分法研究了水下湿法单道焊接的热过程曲线和冷却速率。模型中采用 Adams 方法以及 Tsai 和 Masubuchi 的半经验关联式,获得了水下焊接过程中焊件的温度随时间的变化趋势,得出水下湿法焊接焊件的冷却速率快于空气中焊接相同焊件同等位置的冷却速率,且水下湿法焊接时焊件热影响区的显微组织几乎不受水温影响,这一结果得到试验证实。Ghadimi 等人^[5]采用三维有限差分方法对薄钢板的水下湿法焊接进行模拟,通过建模和求解适当的热传导方程,获得了水下湿法单向焊接焊件的温度曲线、加热过程曲线和冷却时间。通过分析焊接参数的影响,得出周围流体的类型对焊接的温度变化影响显著,水下焊接的冷却时间较空气中焊接要少的多。

1.2 有限元分析法

有限元分析法与有限差分法都是广泛应用的流体力学数值计算方法,具有广泛适用性。目前也是水下焊接模拟计算应用最多的一种方法,主要用于模拟计算水下焊接温度场和应力应变的变化规律。

针对水下焊接温度场的模拟计算,国内对水下焊接温度场研究较早的李传曦^[8]采用有限元法分析计算了水下焊接温度场,精确性较高。陈楚等人^[9]采用有限元法对非线性焊接温度场进行了分析,提出了局部干法水下焊接温度场计算的数学模型,并对 6 mm 钢板的局部干法水下焊接的温度场进行了实例计算,比较了不同焊接条件对熔合区冷却特性的影响,其结果表明,增加有效屏蔽半径,采用小功率低焊速配合以及减小底部的导热条件都能够提高水下焊接接头的质量。Hamamm 等人^[10]采用有限元分析方法研究了水下湿法等离子气体保护焊的温度场问题,建立了新的焊接模型,分析了焊件表面传热对焊接温度的影响。Liu 等人^[11]采用 ANSYS 有限元分析软件对水下湿法焊接板材的三维温度场进行了模拟,并研究了影响水下焊接温度场的几个主要因素。贾剑平等^[12]采用 ANSYS 软件对水下局部干法焊接的冷却温度变化动态过程进行模拟分析,得到了水下局部干法焊接试件温度场的变化情况和分布规律,为研究水下焊接的应力应变场和质量分析奠定了基础。Zhang 等人^[13]采用 MSC. MARC 软件建立了水浸搅拌摩擦焊的三维热源模型,对水浸搅拌摩擦焊的温度场进行了研究,其模拟结果与温度场

的真实值具有很高的拟合程度。

也有研究者对水下焊接温度场和应力应变同时展开研究,并建立起两者之间的联系。Ronda 等人^[14]将水下焊接问题归结为热弹性体的热自由边界问题和热机械接触问题,并通过有限元模拟了焊接接头处的温度场和热应力分布。Lindhorst 等人^[15]研究了水下湿法焊接对裂纹尖端张开位移的影响,对其焊接过程进行了数值模拟,并采用有限元方法对非静态温度场和焊接残余应力进行计算,确定了弯曲板焊缝表面固定的裂纹张开位移,同时对水下湿法焊接和干法焊接的结果进行了比较。赵博^[16]使用 SYSWELD 及相关软件对水下焊接温度场和热过程进行了数值分析建模,得到不同焊接水深、不同水流速度时的焊缝形状、尺寸以及焊接热循环等数据。同时建立焊接应力应变模型,获得了水下焊接环境中工件的应力应变规律,并将应力应变模型与焊接温度场模型相结合,实现了水下焊接接头的热 - 力耦合模拟。

Sun 等人^[17]还对水下爆炸焊的冲击波和焊板的变形过程进行数值模拟,采用的软件为 ANSYS/LS - DYNA,得到爆炸焊过程中焊板的速度和压力分布。同时发现,水能抑制爆炸焊过程中复合板产生严重变形。

李连波等人^[18]还利用 CAD 工具辅助建模,采用有限元分析软件 MSC MARC 对水下焊接焊丝进行矫直有限元模拟,将矫直后的焊丝节点坐标拟合,得出矫直后焊丝的形状,最终比较得出三矫直轮之间位置的最佳值,为焊丝矫正系统的设计提供数据支持。

1.3 有限体积法

有限体积法是近年来发展非常迅速的一种离散化方法,计算效率高,在一定程度上它既保持了有限差分法的计算简单性,又兼有有限元法的精确性,但目前有限体积法在水下焊接中的应用还较少。

Isikilar 等人^[19]基于有限体积法模型,开发了立体厚矩形板在水下焊接时的三维瞬态热传导数值模型,研究了焊接板材的瞬间热传导过程,包括点热源模拟电弧、对流、辐射和沸腾表面边界条件。计算采用了一种以移动热源为中心的可变网格尺寸算法,该计算结果与文献中结果比较,显示出良好的一致性。Schmidt 等人^[20]对在 0.1 MPa 到 10 MPa 高压水环境下的钨极氩弧焊 (TIG) 的燃烧电弧特性进行了研究,通过采用有限体积法对守恒方程的自洽数值求解,得出了电弧温度场、等离子体射流速度场、电流密度场的分布形态,其中电弧温度的模拟结果与测量结果基本吻合,文章指出随着环境压力的增加,电弧逐渐收缩,电弧的最高

温度和最大速度减小,并且电弧能量的耗散与压力的平方根成正比。

2 计算机仿真技术在水下焊接中的应用现状

计算机仿真技术在制定焊接工艺、研制焊接设备、改进控制系统等方面的研究,有助于提前构思、发现和解决水下焊接时存在的问题,实现高效水下焊接。目前国内外学者在该领域展开了一系列研究工作。

由于水下高压焊接时,环境参数特别是压力对电弧行为影响很大,但对其影响规律的研究,通过试验方法不仅费时费力,且难以达到理想效果。李志刚等人^[21]提出采用计算机数值模拟仿真的方法来解决,他采用旋转电弧传感器为跟踪传感器,建立熔化极惰性气体保护焊(MIG)下的电弧数学模型,对不同压力下的电弧温度场、速度场、电流密度场进行了研究。

针对水下焊接焊缝质量差等一系列问题,陈海军等人^[22]研制了一种旋转电弧传感器用来改善水下局部干法焊接的质量。采用流体力学仿真软件对传感器排水罩的排水效果进行模拟,验证排水罩结构设计的可行性。通过焊接试验发现,局部干法焊接旋转电弧扫描焊炬改善了水下焊接的质量。贾文卓等人^[23]也对局部干式焊接的关键部件排水气罩进行了研究,设计了排水气罩的结构,并采用计算机数值仿真技术对罩内气体状态进行了模拟,得出了排水效果最佳的进气方式为带镇静气室的环向进气方式,并通过试验验证了这一结果。李兰等人^[24]以圆形排水罩结构作为局部排水装置进行研究,利用 FLUENT 软件进行仿真,探索圆形排水罩的排水过程,分析不同的进气方式和排水方式对罩内相分布的影响,以及对工件表面流体湍流状态的影响,并将仿真的排水过程与试验进行对比,验证仿真的准确性。

为了实现水下焊接自动化,对全位置智能化水下焊接机器人系统的研究也成为热点之一。挪威的 Dag 等人^[25]采用计算机仿真技术对高压干法水下焊接进行了研究。利用 SOLIDEDGE 建立了焊接舱和焊接机器人的 3D 模型,再将其转化为 L-grip 运动模型,通过合适的控制程序,最终将整个海底管道的维修操作过程演示出来,这对焊接工艺新思路的制定,预测焊接过程存在的问题具有重要意义。何银水^[26]在研究水下焊接焊缝的识别与跟踪时,对水下自动焊接的控制系统进行了设计,采用模糊控制方法并用 MATLAB 对该系统进行仿真和控制,得出对于焊接这样的非线性控制系统,模糊控制系统较比例-积分-微分(PID)控制系统更能胜任。英国

Cranfield 大学海洋技术研究中心^[27]为了实现水下无人焊接,从操作员培训、焊接规划、离线编程等方面考虑,用 WORKSPACE 软件和 ASEA IRBL6/2 机器人建立了一套水下焊接遥控仿真系统,在该系统上进行了水下环境模拟、远端操作器、避障等方面的研究。

高辉等人^[28]采用 ABAQUS 有限元计算软件,对水下摩擦螺柱焊的焊接过程进行了仿真研究,通过对焊接温度场以及应力场的分析,较好的解释了干式环境和有水环境下采用相同焊接工艺参数的焊接接头质量存在差异的现象,提出在有水环境中进行摩擦螺柱焊,宜采用高旋转速度、低压力的焊接工艺,水的冷却作用可有效改善焊接接触面的温度场分布不均现象,且较低的焊接压力可降低对焊接工件的结构强度要求。

王健^[29]基于粒子物理学和静电场角度,利用电磁有限元分析软件 VECTOR FIELDS 建立水下湿法 TIG 焊的模型,对水下湿法焊接的电弧进行了仿真,并采用对比借鉴前人所做试验的方式,来验证此种方法的可行性。在此基础上,再结合旋转磁场,对水下湿法焊接电弧和外加旋转磁场进行了联合仿真,来研究电弧在旋转磁场下的运动行为。

3 存在的问题及发展展望

目前,计算机模拟及仿真技术在水下焊接的研究中取得了一定成果,但存在需要改进和深入研究的地方,下一阶段的研究重点可以从以下几方面入手:

(1)水下焊接电弧的模拟方面。对于水下湿法焊接缺少精确描述水深对电弧形态影响规律的有关数据,在水深对电弧能量分布的影响以及水流状态对表面综合散热条件的影响方面,开展水下湿法焊接工艺试验,测试不同水深下的电弧形态和综合散热系数;对于局部干法的高压电弧模拟方面,这些模拟多是在一些假设条件下进行的,这些假设都与实际情况不太相符,影响了模拟的准确性,未来高压电弧模拟应结合熔池区金属流动和熔滴过渡对电弧的影响来建立模型。

(2)对于水下焊接残余氢的模拟方面,未来应结合焊接残余应力、不同组织对氢扩散的影响,将温度场、应力场作为预定义载荷加载到氢扩散模型中,模拟较为实际的氢扩散过程,建立焊接氢致裂纹的定量判据,实现对水下焊接氢致裂纹的数值模拟预测。

(3)对于水下焊接温度场的数值模拟,需要结合热源的形状和能量分布特点、焊件的散热条件,以及金属的熔化、凝固和相变引起的潜热变化等方面,改进已有模型,提高数值模拟的精度。

(4)加强计算机数值模拟技术在水下自动焊接研究中的应用,完善水下焊接机器人的功能,开展水下机器人自主定位、焊缝位置检测、跟踪技术以及水下焊接质量控制等方面的工作,尽早实现焊接机器人从事完全的水下焊接活动。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 杜乃在. 计算机仿真在焊接学科中的应用[J]. 焊接技术, 1999(1): 42-44.
- [4] 刘多, 刘一搏, 周利, 等. 水下湿法焊接材料的研究进展[J]. 焊接, 2012(12): 18-22.
- [5] Ghadimi P, Ghassemi H, Ghassabzadeh M, et al. Three-dimensional simulation of underwater welding and investigation of effective parameters[J]. Welding Journal, 2013, 92: 239-249.
- [6] Fukuoka T, Fukui S. Analysis for cooling process of underwater welding-comparison with welding in air[J]. Journal of the Marine Engineering Society in Japan, 1993, 22(12): 767-774.
- [7] Dill J F. Model for estimation of thermal history produced by a single pass underwater wet weld[D]. Naval Postgraduate School, Monterey, America, 1997.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Hamann R, Mahrenholtz 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.
- [11] 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.
- [12] 贾剑平, 陈建平, 刘云龙, 等. 基于ANSYS的水下局部干法焊接过程温度场分析[J]. 电焊机, 2012, 42(11): 1-5.
- [13] Zhang H J, Liu H J, Yu L. Thermal modeling of underwater friction stir welding of high strength aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23: 1114-1122.
- [14] Ronda J, Mahrenholtz O, Hamann O. Thermomechanical simulation of underwater welding processes[J]. Archive of Applied Mechanics, 1992, 62: 15-27.
- [15] Lindhorst L, Mahrenholtz O. On the influence of wet underwater welding on CTOD- δ_5 [J]. International Journal of Fracture, 1999, 97: 263-277.
- [16] 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: 山东大学硕士学位论文, 2012.
- [17] Sun W, Li X J, Kazuyuki H. Numerical simulation of underwater explosive welding process[J]. Materials Science Forum, 2014, 767: 120-125.
- [18] 李连波, 王环环, 马洪伟, 等. 水下焊接焊丝矫直机构设计的有限元分析[J]. 焊接设备与材料, 2015, 44(2): 43-45.
- [19] Isiklar Y V, Giegin I. Numerical modeling of underwater welding[J]. Journal of Naval Science and Engineering, 2011, 7(2): 11-29.
- [20] Schmidt H P, Specthofer G. Experimental and theoretical investigation of high-pressure arcs. I. The cylindrical arc column (two-dimensional modeling)[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1996, 24(4): 1229-1238.
- [21] 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.
- [22] 陈海军, 张华, 毛志伟, 等. 局部干法焊旋转电弧传感设计及数值模拟[J]. 热加工工艺, 2011, 40(11): 129-135.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Dag E. Virtual deep-sea unmanned welding[D]. Norway Narvik University College, Norway, 2001.
- [26] 何银水. 水下焊接焊缝的识别与跟踪[D]. 南昌: 南昌大学硕士学位论文, 2006.
- [27] 舒新宇, 王国荣, 李国进. 水下机器人技术在焊接中的应用现状与前景[J]. 电焊机, 2005, 35(6): 24-28.
- [28] 高辉, 焦向东, 周灿丰, 等. 基于Abaqus的水下摩擦螺柱焊焊接过程仿真[J]. 焊接学报, 2014, 35(12): 50-54.
- [29] 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: 华东交通大学硕士学位论文, 2015.

作者简介: 张琳琳, 1980年出生, 硕士, 工程师。主要从事水下焊接及结构设计研究工作, 已发表论文10余篇。