

钻井平台建造中计算焊接力学综述

赵宏权

(江苏海事职业技术学院, 江苏 南京 211170)

摘要 钻井平台作为海洋油气开采的关键设施, 其建造质量和结构安全性直接影响到整个海洋油气开发过程的经济性和安全性。焊接作为平台建造中不可或缺的工艺, 对结构的力学性能具有重要影响。本文综述了计算焊接力学在钻井平台建造中的应用, 重点介绍了焊接过程中的温度场、应力场和变形的数值模拟方法, 讨论了焊接残余应力和变形对平台结构性能的影响, 并对未来的发展趋势进行了展望, 旨在为同行业人员提供借鉴。

关键词 钻井平台; 焊接; 计算焊接力学

中图分类号: TE21

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)09-0100-03

海洋钻井平台是进行海上油气资源开采的基础设施, 其结构复杂、工作环境恶劣, 对其力学性能和可靠性提出了极高的要求。焊接作为连接钢结构的重要工艺, 广泛应用于平台的建造过程中。然而, 焊接过程中产生的高温和快速冷却往往会引起较大的热应力和变形, 进而影响平台的力学性能和使用寿命。计算焊接力学通过数值模拟方法, 研究焊接过程中的温度场、应力场和变形情况, 能够为优化焊接工艺、提高焊接质量提供理论指导^[1]。因此, 研究计算焊接力学对钻井平台建造具有重要的理论意义和实际应用价值。本文将详细综述计算焊接力学在钻井平台建造中的研究进展, 旨在为相关领域的研究和工程实践提供参考。

1 钻井平台建造中的焊接工艺

1.1 焊接方法及其应用

在钻井平台建造中, 常用的焊接方法主要包括手工电弧焊(SMAW)、埋弧焊(SAW)、气体保护焊(GMAW和GTAW)以及激光焊接(LBW)等。不同的焊接方法适用于不同的焊接部位和结构形式。例如, 手工电弧焊适用于中小型构件的焊接, 埋弧焊适用于大型构件的长缝焊接, 而气体保护焊则适用于高强度钢的焊接。激光焊接由于其高效、精确的特点, 在某些关键部位的焊接中也得到了应用。

1.2 焊接过程中的热力学行为

焊接过程中的热力学行为主要包括温度场的分布、热输入的变化以及热应力和变形的产生。了解和控制这些热力学行为对提高焊接质量、减少焊接缺陷、延长结构使用寿命具有重要意义。以下将从热源模型、温度场分布、热传导机制、热应力和变形的产生及其影响等方面详细探讨焊接过程中的热力学行为^[2]。

1. 热源模型。焊接过程中, 热源模型是研究温度场和热力学行为的基础。常用的热源模型包括: (1) 高斯分布模型: 适用于手工电弧焊(SMAW)和气体保护焊(GMAW)等焊接方法。该模型假设热源在焊接区域呈高斯分布, 能较好地描述热输入的集中性。(2) 双椭圆分布模型: 适用于埋弧焊(SAW)和激光焊接(LBW)等深熔焊接方法。该模型考虑了热源在焊接方向和垂直方向上的分布特点, 能更准确地描述热输入的深度和宽度。(3) 双锥分布模型: 适用于等离子弧焊(PAW)等高能焊接方法。该模型通过双锥形的热源分布, 能够更精确地模拟焊接过程中热输入的扩散和集中^[3]。这些热源模型的选择和参数设置直接影响温度场的模拟结果, 进而影响焊接应力和变形的预测精度。

2. 温度场分布。焊接过程中, 热源将热量输入工件中, 形成复杂的温度场分布。温度场的分布特点主要包括: (1) 温度梯度: 焊接区域温度梯度较大, 热源中心温度最高, 向外逐渐降低。温度梯度的大小影响热应力和变形的产生^[4]。(2) 热循环过程: 焊接过程中, 材料经历加热和冷却的热循环过程。热循环的频率和幅度对材料的显微组织和力学性能有重要影响。(3) 热影响区(HAZ): 焊缝两侧的热影响区是温度场分布的重要区域。热影响区的宽度和温度梯度决定了材料的热损伤程度和力学性能变化。通过数值模拟, 可以获得温度场的分布情况, 进而分析焊接过程中热应力和变形的产生及其影响。

3. 热传导机制。焊接过程中的热传导机制主要包括: (1) 导热: 热量通过材料的导热性在工件中传播。材料的导热系数、密度和比热容等热物理参数影响热传导过程。(2) 对流: 焊接过程中, 空气或保护气体与工件表面接触, 形成对流换热。对流换热系数和气

体流速影响焊接区域的冷却速度。(3) 辐射: 高温焊接区域通过热辐射向周围环境散热。辐射换热系数和表面辐射率影响焊接过程中热量的散失。这些热传导机制相互作用, 共同决定了焊接过程中温度场的分布和变化规律。

4. 热应力和变形的产生。焊接过程中, 温度场的变化引起材料的热膨胀和收缩, 导致热应力和变形的产生。热应力和变形的产生机制主要包括: (1) 热膨胀和收缩: 焊接过程中, 热源区域的材料温度急剧升高, 产生热膨胀; 冷却过程中, 材料温度迅速降低, 产生热收缩。这种热膨胀和收缩的不均匀性导致热应力和变形的产生。(2) 相变应力: 在某些高强度钢和合金材料中, 焊接过程中材料会发生相变, 导致体积变化, 产生相变应力。例如, 奥氏体不锈钢在焊接过程中会发生奥氏体到马氏体的相变, 导致相变应力的产生。(3) 残余应力: 焊接结束后, 材料内部残留的应力称为残余应力。残余应力是焊接过程中热应力的积累和释放结果, 影响结构的力学性能和使用寿命。

5. 热应力和变形的影响。焊接过程中产生的热应力和变形对结构的力学性能和使用寿命具有重要影响。具体影响包括: (1) 焊接裂纹: 过大的热应力可能导致焊缝和热影响区产生裂纹, 降低结构的强度和可靠性。(2) 焊接变形: 焊接变形包括角变形、弯曲变形和扭曲变形等, 影响结构的尺寸精度和装配质量。(3) 疲劳性能: 残余应力影响结构的疲劳性能, 可能导致结构在循环载荷作用下发生疲劳破坏。(4) 应力腐蚀: 残余应力和腐蚀环境共同作用可能导致应力腐蚀开裂, 影响结构的耐久性和安全性。通过数值模拟和实验研究, 可以分析热应力和变形的产生规律和影响机制, 指导焊接工艺参数的优化和结构设计的改进。

2 计算焊接力学的数值模拟方法

2.1 有限元法 (FEM)

有限元法是一种常用的数值模拟方法, 广泛应用于焊接过程的数值模拟中。通过将结构离散为有限数量的单元, 有限元法能够有效地模拟焊接过程中的温度场、应力场和变形情况。在焊接模拟中, 通常采用非线性热力耦合分析方法, 即首先进行热分析, 得到温度场分布, 然后进行力学分析, 得到应力场和变形情况。

2.2 有限差分法 (FDM)

有限差分法是一种基于差分方程的数值模拟方法, 适用于焊接过程的温度场和应力场分析。相比有限元法, 有限差分法在处理简单几何结构和边界条件时具

有一定的优势。然而, 对于复杂结构的焊接模拟, 有限差分法的应用受到一定限制。

2.3 有限体积法 (FVM)

有限体积法是一种基于守恒方程的数值模拟方法, 广泛应用于焊接过程的流体和热传导问题。有限体积法通过将计算区域划分为有限数量的体积单元, 利用守恒方程进行数值求解, 能够有效模拟焊接过程中的温度场和应力场分布。

2.4 其他数值模拟方法

除了上述三种主要方法外, 还有一些其他数值模拟方法在焊接力学研究中得到应用。例如, 基于拉格朗日方法的网格自适应技术能够在焊接过程中动态调整网格, 提高计算精度; 基于蒙特卡罗方法的随机模拟技术能够模拟焊接过程中的随机因素, 提高模拟结果的准确性^[5]。

3 焊接过程中的温度场模拟

3.1 温度场的基本理论

温度场的分布是焊接过程中的重要研究内容之一。焊接过程中, 热源输入的热量通过导热、对流和辐射等方式在工件中传播, 形成复杂的温度场分布。研究温度场的分布规律对于控制焊接质量、减少焊接缺陷具有重要意义。

3.2 温度场的数值模拟方法

温度场的数值模拟通常采用热力耦合分析方法, 即首先建立热源模型, 进行热分析, 得到温度场分布。常用的热源模型包括高斯分布模型、双椭圆分布模型和双锥分布模型等。这些模型能够较好地描述不同焊接方法下的热源特性, 提高模拟结果的准确性。

3.3 温度场模拟的应用实例

在钻井平台建造中, 温度场的数值模拟被广泛应用于焊接工艺参数的优化和焊接质量的控制。例如, 通过模拟不同焊接工艺参数下的温度场分布, 可以确定最佳的焊接参数, 减少焊接缺陷的产生; 通过模拟复杂结构的温度场分布, 可以预测焊接过程中的热应力和变形情况, 指导实际的焊接操作。

4 焊接过程中的应力场和变形模拟

4.1 应力场和变形的理论基础

焊接过程中的应力场和变形是由温度场的变化引起的。焊接过程中, 局部温度的急剧升高和冷却导致材料的热膨胀和收缩, 产生热应力和变形。研究焊接过程中的应力场和变形规律, 对于提高焊接质量、减少焊接残余应力和变形具有重要意义。

4.2 应力场和变形的数值模拟方法

应力场和变形的数值模拟通常在温度场模拟的基础上进行。通过热力耦合分析方法,首先进行温度场模拟,得到温度场分布,然后进行力学分析,得到应力场和变形情况。常用的应力场和变形模拟方法包括有限元法、有限差分法和有限体积法等^[6]。

4.3 应力场和变形模拟的应用

在大型钻井平台的建造过程中,模拟焊接不同区域的应力场和变形,指导实际焊接操作,确保整体结构的稳定性和安全性。在模块化建造中,通过模拟各模块的焊接应力和变形,优化模块连接部位的焊接工艺,确保各模块在组合后符合设计要求。通过模拟钻井平台在海洋环境下的应力场和变形,优化焊接工艺和结构设计,使平台能够更好地适应恶劣的海洋环境,延长使用寿命。

1. 焊接工艺优化。(1)焊接速度:通过模拟不同焊接速度下的应力场和变形情况,找到能够最大限度减少残余应力和变形的最佳速度。(2)焊接电流和电压:模拟不同的焊接电流和电压组合对焊接过程中的温度场和应力场的影响,优化参数以控制热输入,从而减少焊接缺陷和变形。(3)热源移动路径:模拟不同的热源移动路径,分析其对应应力场和变形的影响,选择最有利于减少应力集中和变形的路径。(4)焊接顺序:通过数值模拟不同的焊接顺序,比较其对残余应力和变形的影响,选择能够有效减小应力和变形的最佳顺序。(5)多道焊接:模拟多道焊接过程中,各道焊缝相互作用下的应力场和变形情况,优化多道焊接工艺,确保每道焊缝的残余应力最小化。(6)预热处理:模拟预热处理对焊接过程中温度场和应力场的影响,确定最佳的预热温度和时间,以减少焊接过程中产生的热应力和变形。(7)后热处理:模拟后热处理过程中的温度变化及其对残余应力的释放效果,优化后热处理工艺,进一步减小残余应力和变形。

2. 结构设计改进。(1)应力集中分析:通过数值模拟预测焊接过程中复杂结构中的应力集中区域,指导设计改进以避免应力集中点,减少结构失效的风险。

(2)变形趋势预测:模拟焊接过程中结构的变形趋势,提前识别可能发生的过度变形区域,调整设计或焊接工艺以防止过大变形。(3)加固结构设计:通过数值模拟分析特定区域的应力场和变形情况,确定需要加固的部位,设计适当的加固结构,确保整体结构的强度和稳定性。(4)焊缝位置优化:根据模拟结果调整焊缝位置,避免在应力集中区域布置焊缝,从而减少

焊接残余应力的影响。(5)材料特性模拟:模拟不同材料在焊接过程中的热力学行为,选择适合特定焊接工艺和结构要求的最佳材料。(6)材料改性:通过模拟分析材料在高温下的表现,研究材料改性的方法,以提高材料的焊接性能和抗应力腐蚀能力。

5 未来发展趋势

一是高效精确的数值模拟方法。随着计算机技术的发展和数值模拟方法的进步,未来的焊接力学研究将更加依赖高效精确的数值模拟方法。基于云计算和并行计算技术的高性能计算平台将大大提高数值模拟的效率和精度,为焊接工艺的优化和结构设计的改进提供更强大的支持。二是多物理场耦合分析。焊接过程是一个复杂的多物理场耦合过程,包括热力耦合、流体耦合和电磁耦合等。未来的焊接力学研究将更加注重多物理场耦合分析,通过综合考虑不同物理场的相互作用,提高模拟结果的准确性和可靠性。三是智能焊接技术。智能焊接技术将成为未来焊接力学研究的重要方向,通过引入机器学习和大数据分析技术,可以实现焊接过程的智能监控和实时优化,提高焊接质量和效率。

6 结束语

本文综述了计算焊接力学在钻井平台建造中的应用,重点介绍了焊接过程中的温度场、应力场和变形的数值模拟方法,讨论了焊接残余应力和变形对平台结构性能的影响。通过数值模拟方法,可以有效地优化焊接工艺参数,减少焊接缺陷,提高焊接质量和结构性能。未来,随着计算机技术和数值模拟方法的不断发展,计算焊接力学在钻井平台建造中的应用将更加广泛和深入,为海洋油气开采提供更强大的技术支持。

参考文献:

- [1] 张坦.复杂焊接结构件残余应力与变形有限元分析[D].镇江:江苏科技大学,2021.
- [2] 余昌莲,张春侠,苏开浪,等.不同厚度钢板对接焊缝残余应力和变形的数值模拟[J].焊接技术,2021,50(05):32-36.
- [3] 王刚.面向大型结构件的焊接残余应力及变形预估[D].柳州:广西科技大学,2022.
- [4] 朱梓坤.Q690D钢热影响区组织热模拟和焊接应力与变形数值模拟[D].武汉:华中科技大学,2022.
- [5] 俞树文.焊接残余应力对结构动态特性影响的研究[D].上海:上海交通大学,2020.
- [6] 张旭.厚板对接接头多层多道焊有限元模拟研究[J].焊接技术,2023(10):31-34.