

船舶压力管道安装中的焊接变形控制与应力分析技术

王洪波

招商局工业集团扬州鼎衡船舶有限公司，江苏 扬州 225000

DOI:10.61369/ERA.2025090008

摘 要： 船舶压力管道是船舶系统里的关键构成部分，其安装质量会对船舶的运行安全以及性能造成影响。在安装流程中，焊接变形以及应力方面的问题是影响管道质量的重要要素。在本文中，针对船舶压力管道安装，提出一些新颖的问题，例如新型高强度材料焊接变形控制方面的难题，复杂空间结构管道应力集中分析精准度不够，还有焊接残余应力和动态载荷耦合作用下存在的安全隐患等。对这些问题产生的原因展开深入的分析，并且从工艺优化、技术革新等方面提出解决的办法，目的是提高船舶压力管道的安装质量，保证船舶能够安全且稳定地运行。

关 键 词： 船舶压力管道；焊接变形控制；应力分析；安装技术

Welding Deformation Control and Stress Analysis Techniques in the Installation of Ship Pressure Pipelines

Wang Hongbo

China Merchants Industry Group Yangzhou Dingheng Shipbuilding Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225000

Abstract： Ship pressure pipelines are a critical component of ship systems, and their installation quality directly impacts the operational safety and performance of the vessel. During the installation process, issues related to welding deformation and stress are key factors affecting pipeline quality. In this paper, we address some novel issues related to the installation of ship pressure pipelines, such as challenges in controlling welding deformation of new high-strength materials, insufficient accuracy in stress concentration analysis of complex spatial structure pipelines, and safety hazards under the combined effects of residual welding stress and dynamic loads. We conduct an in-depth analysis of the causes of these issues and propose solutions from the perspectives of process optimisation and technological innovation, with the aim of improving the installation quality of ship pressure pipelines and ensuring the safe and stable operation of the vessel.

Keywords： ship pressure pipelines; welding deformation control; stress analysis; installation technology

引言

船舶压力管道肩负着船舶内部流体运输、能量传送等至关重要的功能，是保障船舶动力系统、燃油系统、液压系统等得以正常运作的关键要素。焊接作为安装船舶压力管道时主要采用的连接手段，在焊接进程中产生的应力和变形会对管道的结构强度、密封性以及尺寸精确程度造成影响，严重的会对船舶的航行安全构成威胁。伴随船舶工业朝着大型化、繁杂化方向发展，对压力管道安装品质的要求持续攀升，深入钻研焊接变形管控与应力分析技术，解决安装过程里的实际难题，对提高船舶建造水准具备重要的意义。

一、船舶压力管道安装期间焊接变形以及应力方面存在的问题

（一）新型材料焊接过程中形变控制难题

伴随船舶工业对于轻量化以及高强度需求的不断增多，如新型高强度合金钢、钛合金等材料在船舶压力管道中的应用变得愈

发普遍。此类材料具备高强度、高韧性等长处，在焊接进程中会存在热导率偏低、热膨胀系数偏大的状况，导致焊接期间局部温度场呈现出分布不均衡的现象，容易产生较大程度的焊接变形^[1]。比如，有一艘船舶在安装钛合金压力管道时，因为焊接工艺参数设置得不合理，管道出现严重扭曲变形问题，这会增加矫正成本，对管道的安装进度以及安装质量也会产生不良影响。除此之

外,新型材料在焊接方面呈现出相对较差的性能状态,对于焊接所采用的工艺以及操作人员具备的操作技能提出极为严苛的要求,常规层面用于控制焊接变形的方法很难契合实际需求。

（二）复杂空间结构管道应力集中分精度不足

船舶当中压力管道的安装空间比较有限,并且其结构呈现出复杂的状态,经常会涵盖数量众多的弯头、三通、异径管等各类管件,进而构建出复杂的空间结构样式。在开展焊接工作的进程中,这些部位很容易出现应力集中的现象,然而传统采用的应力分析办法,如依据经验公式的计算方法以及较为简单的有限元模型分析手段,很难精准地对复杂结构的应力分布情形予以模拟。比如,在船舶机舱里边进行压力管道安装时,因为管道的布局十分紧凑,多个管件的连接处应力集中的问题极为显著,但当前的分析技术无法精确地算出应力集中系数,使得在船舶运行的过程当中,某些部位成为管道出现破裂、发生泄漏的潜在风险之处。

（三）焊接残余应力和动态载荷耦合中存在安全风险

在船舶航行时,压力管道不但要承受内部流体的压力,还会遭受船体振动以及海浪冲击等动态载荷的影响。焊接期间所产生的残余应力和动态载荷彼此耦合,会明显降低管道的疲劳使用寿命以及结构的安全性能。当下针对焊接残余应力和动态载荷耦合作用开展的研究相对较少,缺少有效的评估办法以及预防手段。例如,某艘远洋货轮在运行一段时间后,其压力管道出现疲劳裂纹。经分析可知,焊接残余应力和船舶航行时的动态载荷共同发挥作用,加快裂纹的产生以及扩展,给船舶的运行安全带来严重的威胁。

（四）对焊接工艺参数实施优化面临困难

焊接时运用的工艺参数,如焊接时的电流大小、电压数值以及焊接行进的速度等,会直接对焊接所产生的变形状况、应力大小以及高低产生影响。在船舶压力管道开展安装工作的进程中,鉴于管道自身的材质特性、管壁的厚度情况以及焊接时所处的具体位置等多种要素存在着教大的差异,因此确定统一的焊接工艺参数标准是一件极具难度的事情。并且,以往传统方式下对焊接工艺参数进行调整大多是凭借过往积累的经验,缺少科学合理的优化手段,导致在控制焊接变形以及应力方面的实际效果不太稳定。例如,当对壁厚存在差异的压力管道实施焊接操作之时,若是运用相同的焊接工艺方面的参数,那么较为单薄的管道可能会出现如烧穿、变形超出合理范围等状况,然而较为厚实的管道却可能产生诸如未被完全焊透、应力过度聚集等问题。

（五）焊接变形与应力的监测技术相对滞后

在船舶压力管道的焊接作业进程中,实际上缺少具备高效性的实时监测相关技术,无法在第一时间获取到焊接变形以及应力方面的动态改变信息。当下经常被采用的监测手段,如借助应变片测量、开展超声波检测等,均暴露出测量范围比较有限、操作相对复杂、无法做到实时持续监测等状况。上述情形的出现导致在焊接进程中,一旦产生变形或者应力异常的状况,无法及时采取相应手段进行调整,会加大后续矫正以及修复工作的困难程度,同时也对管道安装的质量以及效率造成不良影响。^[2]

二、对问题产生的缘由予以剖析

（一）材料特性和焊接工艺不匹配

当新型材料被应用到船舶压力管道中,其具有的特殊物理化学性能与传统的焊接工艺呈现出 mismatch 的状况。比如,在对新型高强度合金钢进行焊接作业时,该材料对焊接热输入量呈现出高度的敏感性,在上述情况下,一旦使用传统的焊接工艺,很可能使焊接接头出现诸如晶粒变得粗大、发生脆化等问题,而上述问题进一步会引发较为显著的焊接变形以及残余应力。与此同时,有关新型材料焊接工艺的研究进展相对比较缓慢,缺乏系统的、用于焊接工艺评定以及优化的方法,上述情况导致对焊接变形进行有效控制的难度显著增加。

（二）分析模型和实际结构存在较大差异

常用的应力分析模型,在应对船舶压力管道复杂、多样的空间构造时,经常作出过量的简化操作与假设内容,和实际的结构状况存在着较为显著的差异。例如,在进行有限元分析期间,针对管件相连接之处的几何外形、边界条件等方面的处理,未能达到足够精准的程度,进而使得计算得出的结果同实际的应力分布情形产生较大的偏差。除此之外,当下现存的分析模型很难去考量焊接过程中所出现的动态变化要素,如焊接热源的移动、材料的相变等情况,无法实现对焊接应力的产生以及发展进程进行精准的模拟。

（三）多因素耦合作用的相关研究力度不足

焊接残余应力与动态载荷之间的耦合效应,涉及如材料力学、动力学等诸多学科范畴,其效应的作用机制颇为复杂^[3]。当下有关的研究多数聚焦于单一因素给管道性能带来的影响,而针对多因素耦合效应下管道的力学表现的研究尚显欠缺,缺少实用的理论模型与计算手段用以评估耦合效应,给管道疲劳寿命以及结构安全性造成的影响。这使得在船舶压力管道的设计与安装进程中,难以采取具有针对性的举措来削减安全隐患。

（四）焊接工艺参数的优化方式相对滞后

过往的焊接工艺参数优化大多依靠焊工所积累的经验,以及开展试焊工作来实现,缺少具备科学性的理论引导以及优化办法。伴随船舶压力管道安装标准持续升高,焊接工艺参数的优化方式不能契合实际需求。与此同时,焊接流程会牵涉到多个物理场之间产生相互作用,其中的影响要素较为多样,若采用以往的方法,很难全方位地权衡各个要素之间存在的关联情况,也就难以达成焊接工艺参数的精确优化。

（五）监测技术的研发呈现出滞后态势

船舶压力管道焊接变形与应力的实时监测技术的研发,相较于实际需求呈滞后态势。从某个方面来看,当下所应用的监测设备以及监测技术,在精准程度、可靠性能、实时效应等维度均存有欠缺,难以契合复杂焊接环境状况下的监测需求。从其他方面来看,针对监测技术研发的投入不够充足,与之相关的科研力量呈现分散状态,同时缺少有效的产学研合作机制,到会监测技术的创新能力有所不足,想要研制出适用于船舶压力管道焊接流程的先进监测技术与设备颇具难度。

三、船舶压力管道安装中焊接变形的把控以及应力分析的优化举措

（一）致力于研发适用于新型材料的专用焊接工艺

从当下新型材料所具备的特性入手，启动专项的焊接工艺探究工作，开展专用焊接工艺的研发。通过对焊接方法进行调整、对焊接参数予以优化、对焊接顺序加以改进等诸多举措，对焊接热输入量实施管控，从而削减焊接变形的情况^[4]。比如，在进行钛合金压力管道的焊接作业时，采用钨极氩弧焊（TIG）方式，并且搭配运用小电流、快速焊的工艺参数条件，同时采用先分段跳焊、再对称焊等这样的焊接顺序安排，能够切实有效地降低焊接时产生的变形现象。除此之外，进一步强化对新型材料焊接性能的相关研究工作，构建完善的焊接工艺评定标准体系，以此为焊接工艺的制定工作，提供具有科学性与可靠性的依据。

（二）构建具备高度精确性的应力分析模型

运用较为前沿的数值计算手段以及计算机方面的技术，构建具备较高精度的船舶压力管道应力分析的相关模型。在开展建模工作的进程中，全面考量诸如管道复杂的空间架构情形、焊接进程中的动态改变状况以及材料所呈现出的非线性特质等多方面因素。借助细化网格、精准模拟边界条件等方式，提升模型计算的精准程度。与此同时，将试验所获数据与模型相结合开展验证以及修正作业，保证分析得出的结果具备可靠性质。例如，借助有限元分析软件，对船舶机舱内部的压力管道开展三维建模工作，精准地算出管件连接处的应力集中系数，从而为管道的设计与安装提供确切的应力分析相关数据。

（三）推进多因素耦合作用方面的研究工作

强化对焊接残余应力和动态载荷之间耦合作用的探究活动，构建处于多因素耦合作用状况下，管道力学行为的理论模型以及计算办法。借助试验研究跟数值模拟相互结合的模式，深度剖析耦合作用对管道疲劳寿命，以及结构安全性所产生影响的规律情形。在这一基础上，提出对应的预防以及控制的举措，例如对管道的结构设计加以优化、运用应力消除方面的工艺等，以此减少多因素耦合作用引发的安全风险。比如，在管道设计阶段，凭借科学地布置支撑、吊架，降低动态载荷给管道造成的影响；在焊接工作结束之后，运用如振动时效等手段，消除焊接留存下来的应力^[5]。

（四）运用智能优化算法对焊接工艺参数进行优化

将智能优化算法引入其中，如遗传算法、粒子群算法等，针对焊接工艺参数开展优化工作。以焊接变形以及应力作为优化的目的，全面考量管道的材质、壁厚、焊接所在位置等相关要素，构建多目标的优化模型。凭借算法进行迭代运算，自主探寻最优的焊接工艺参数搭配。例如，运用遗传算法对不锈钢压力管道的焊接工艺参数加以优化，在确保焊接质量达成要求的基础上，让焊接变形以及残余应力显著地减少。与此同时，研发依托于智能算法的焊接工艺参数优化软件，为从事焊接工作的人员提供便利的参数优化工具。

（五）开展先进的实时监测技术和相关设备的研发工作

加大在船舶压力管道焊接变形以及应力实时监测技术研发领域的投入力度，对科研资源予以整合，强化产学研的协作，开展基于光纤传感、数字图像相关（DIC）等技术的实时监测设备的研发工作，达成对焊接变形和应力的高精度且实时连续的监测。比如，借助光纤光栅传感器对管道焊接过程里的应变状况进行实时监测，依据监测所得的数据及时对焊接工艺参数作出调整，以此来控制焊接时产生的变形。与此同时，搭建用于监测数据处理以及分析的系统，对监测数据展开实时性的分析以及预警操作，从而为焊接过程的控制举措给予数据方面支持^[6]。

四、结论

在船舶压力管道安装时，焊接变形控制以及应力分析技术是确保船舶得以安全运行的要点。通过剖析当下存在的如新型材料焊接碰到的棘手问题、应力分析精准度不够这类状况，以及导致这些状况出现的原因，针对性的提出诸如开展专用焊接工艺的研发、构建高精度分析模型此类的优化方法，上述方法若得到落实，能够切实提高船舶压力管道的安装品质，减小由焊接变形以及应力所引发的安全隐患。在未来的阶段，伴随船舶工业持续地向前发展，仍旧需要不断地开展有关技术的研究工作，持续推陈出新工艺以及方法，进而为船舶压力管道的安装事宜，提供更为可靠的技术性保障，以促使船舶工业朝着更高水准的质量方向迈进。

参考文献

- [1] 黄俊杰, 张迪, 杨少杰, 等. 船舶和海洋工程设计中管道防腐研究 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(11): 65-67.
- [2] 李仕麒, 张亚东. 船舶制造中金属材料无损探伤检测技术 [J]. 中国科技信息, 2024, (17): 91-93.
- [3] 姚丙锋. 船舶工程中管系安装技术分析 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(06): 60-62.
- [4] 韩锡岭. 谱减法在船舶管道泄漏检测中的应用研究 [J]. 中国修船, 2023, 36(06): 16-19.
- [5] 孟宏超. 船舶管系设计系统的发展和应用 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(11): 39-41.
- [6] 李海学, 朱青春, 魏颂河. 船舶锚泊作业对海底管道安全风险分析 [J]. 石油工程建设, 2023, 49(05): 47-50.