

Control of residual stresses in ship structure welding and improvement of fatigue life

Guangning Nie

Shanghai COSCO Shipping Heavy Industries Co., Ltd., Shanghai, 201913, China

Abstract

Residual stress in ship structure welding is a key factor affecting the stability and safety of ship structures. Its existence can significantly reduce the fatigue resistance of materials and shorten the service life of ships. The research aims to regulate residual stress and improve fatigue life through systematic strategies, in order to promote the development of green and intelligent shipbuilding. Methodologically, a multi-scale residual stress control technology system is constructed, covering optimization of welding process design, precise control of process parameters, and innovation in post weld treatment; Promote systematic collaborative optimization of welding materials and processes, including the application of low matching materials, development of new welding technologies, and dynamic adjustment of process parameters; Implement a full lifecycle health monitoring and intelligent maintenance strategy, integrating IoT, digital twin, and intelligent maintenance technologies. Systematic control strategy is the key path to achieving long service life and high reliability operation of ship structures.

Keywords

ship structure; Welding; Residual stress; Regulation

船体结构焊接残余应力调控与疲劳寿命提升

聂广宁

上海中远海运重工有限公司, 中国·上海 201913

摘要

船体结构焊接残余应力是影响船舶结构稳定与安全的关键因素, 其存在会显著降低材料抗疲劳性能, 缩短船舶服役周期。研究旨在通过系统化策略调控残余应力并提升疲劳寿命, 助力绿色智能造船发展。方法上, 构建多尺度残余应力调控技术体系, 涵盖焊接工艺设计优化、过程参数精准控制及焊后处理创新; 推进焊接材料与工艺的系统性协同优化, 包括低匹配材料应用、新型焊接技术开发及工艺参数动态调整; 实施全生命周期健康监测与智能维护策略, 集成物联网、数字孪生及智能维修技术。系统化调控策略是实现船舶结构长寿命、高可靠运行的关键路径。

关键词

船体结构; 焊接; 残余应力; 调控

1 引言

船体结构于复杂海洋环境里长期投入使用, 焊接残余应力身为影响结构稳定性的关键要素, 会致使材料抗疲劳性能降低, 以及可能造成裂纹萌生以及扩展, 对船舶安全构成威胁, 提高船体疲劳寿命是延长服役周期以及降低全生命周期成本的核心办法, 在这样的背景状况下, 对焊接残余应力展开系统化调控并且优化疲劳寿命管理策略, 变成推动绿色智能造船技术发展的关键所在。本文从技术体系构建、工艺协同优化及智能维护三方面展开探讨, 为提升船体结构可靠性提供理论支撑与实践路径。

【作者简介】聂广宁(1985-), 男, 中国河南开封人, 本科, 工程师, 从事船体结构、制造修理、结构焊接等研究。

2 船体结构焊接残余应力调控与疲劳寿命提升的必要性

船体结构在长时间的服役进程里承受着复杂的交变载荷、波浪冲击以及腐蚀环境, 其安全性和耐久性对于船舶的运营安全以及使用寿命有着直接的关联, 焊接是船体建造过程中最为主要的连接方式, 在焊缝以及热影响区不可避免地会产生残余应力, 这些残余应力有可能引发焊接变形以及尺寸不稳定, 还会与外部载荷叠加在一起, 使得应力集中加剧, 成为疲劳裂纹萌生和扩展的关键引发因素。

2.1 残余应力是影响结构稳定与安全的关键因素

在焊接进程当中, 局部出现不均匀的加热以及冷却状况, 使得材料产生塑性变形, 冷却结束之后便形成了复杂的残余应力场, 一般在焊缝区域呈现为高拉应力状态, 此种内应力在没有外部载荷的情形下已然存在于结构内部, 当船

舶在海上航行之时,波浪载荷跟结构自重共同作用于焊缝,残余拉应力会提升局部应力水平,加快材料屈服,引发早期开裂。在船体应力集中的区域,像是角焊缝、开孔处或者结构突变的部位,残余应力与工作应力的叠加效应更加明显,极容易引发脆性断裂或者疲劳失效,要借助焊后热处理、振动时效或者超声冲击等技术手段,有效释放或者均化残余应力,降低其对结构安全的潜在威胁,保证船体在复杂工况下的结构稳定性^[1]。

2.2 提升疲劳寿命是延长船舶服役周期的核心途径

船体结构遭受破坏大多是因为疲劳损伤,其中焊接接头大多时候是疲劳强度较为薄弱的地方,残余拉应力会降低接头的疲劳极限,使裂纹萌生寿命缩短,研究显示,当焊缝表面存在残余拉应力时,其疲劳强度有可能下降超过30%,运用锤击强化、喷丸处理或者高频机械冲击等表面强化技术,可在焊趾区域引入有益的残余压应力,有效抑制裂纹扩展,提升焊接接头的疲劳性能。优化焊接工艺来减少咬边、未熔合等初始缺陷,也可以从根源上改善疲劳行为,在高应力区域采用全熔透焊缝设计并做平滑过渡处理,降低应力集中系数,对提升关键部位的抗疲劳能力很关键。

2.3 系统化调控策略助力绿色智能造船发展

随着船舶朝着大型化、高速化以及轻量化方向不断发展,对于结构可靠性的要求也在日益提升,把残余应力调控以及疲劳寿命评估融入船舶设计和制造的整个流程当中,构建起覆盖工艺优化、过程监控直至焊后处理的系统化管理机制,这样做可提升产品质量,也可减少后期维修与返工情况的发生,降低全生命周期成本。结合数字化孪生与大数据分析技术,达成残余应力预测以及疲劳寿命仿真,为结构优化提供科学依据,推动船体制造朝着智能化、可持续的方向迈进^[2]。在这一系统化调控进程中,还应注重绿色理念的深度融合。选用环保型焊接材料与低能耗焊接设备,从源头上减少能源消耗与污染物排放。同时,利用智能监控系统实时采集焊接过程中的能耗数据,精准分析并优化能源使用效率。针对焊后处理环节,研发绿色高效的残余应力消除技术,如激光冲击强化等,在提升疲劳寿命的同时降低对环境的影响。通过将绿色制造与智能调控有机结合,不仅能够满足船舶行业高质量发展的需求,更能在全球绿色航运转型浪潮中抢占先机,实现经济效益与环境效益的双赢。

3 船体结构焊接残余应力调控与疲劳寿命提升的策略

3.1 多尺度残余应力调控技术体系构建

焊接残余应力的形成属于热-力-冶金多物理场耦合作用下的复杂过程,针对其调控需要从焊接工艺设计、过程控制以及焊后处理这三个方面来构建多尺度技术体系,在工艺设计阶段的时候,借助优化焊接顺序以及拘束度控制,可有效地降低残余应力的积累,比如说,采用对称跳焊、分段退

焊等顺序策略,可打破热输入的连续性,让结构内部应力场相互抵消,对于厚板结构而言,依靠预留反变形量或者使用弹性夹具,可减少焊接过程中的刚性拘束,降低残余拉应力峰值。

焊接过程的控制重点在于对热输入参数进行精确调节,热输入量由公式 $Q = \eta UI/v$ 确定,它对焊缝以及热影响区的温度梯度有着直接的影响,倘若热输入过高,就会致使晶粒粗化,并且残余应力增大,要是热输入过低,又有可能引发未熔合等缺陷,借助构建热输入、残余应力以及组织性能之间的量化关系模型,可确定最佳的工艺窗口。一般情况下,把热输入控制在 15 至 25kJ/cm 的范围之内,同时配合适宜的层间温度,也就是 100 至 200℃,来让焊缝区的残余拉应力降低超过 30%,另外运用脉冲焊接、激光-电弧复合焊等新型热源技术,可借助缩短热作用时间或者细化熔池形态,抑制残余应力的产生。

传统的机械消除法,像是振动时效以及锤击,尽管可在一定程度上释放应力,然而却存在着处理深度受限,并且容易引发二次损伤等问题,现代的处理技术更偏向于借助材料塑性变形或者相变来诱导压应力,超声波冲击强化技术,也就是 UIT 技术,它借助高频振动撞针在焊缝表面产生微区塑性变形,可形成深度达到 1mm 的压应力层,让焊趾部位残余压应力处于 -200 至 -300MPa 之间,延缓疲劳裂纹萌生。局部热处理是依靠感应加热或者火焰加热使材料发生相变,利用马氏体向贝氏体或者珠光体的转变体积收缩,在焊缝区引入有益压应力,改善接头韧性,对于封闭舱室或者复杂结构而言,可以采用柔性加热毯或者电磁感应技术来实现精准控温,防止整体热处理带来的结构变形风险^[3]。

利用有限元分析即 FEA 来开展焊接过程仿真,可构建涉及热传导、相变潜热以及蠕变效应的多场耦合模型,精准预测不同工艺参数情形下的应力分布状况,借助参数化扫描以及敏感性分析,可迅速筛选出最优的工艺组合,以此减少物理试验的次数,比如在某大型集装箱船的建造过程当中,依靠模拟并优化焊接顺序,使得关键节点残余应力的标准差得以降低。依靠有限元分析可深入剖析不同材料在焊接时的热力耦合行为,为新型船舶材料的焊接工艺开发提供理论支撑,模拟过程中能清晰呈现焊缝及热影响区的微观组织演变,提前预判可能出现的焊接缺陷,像裂纹萌生位置、夹杂物分布等,在工艺设计阶段采取针对性措施进行规避,基于 FEA 建立的数据库可不断积累经验数据,借助机器学习算法挖掘数据价值,实现工艺参数的智能推荐,加速绿色智能造船中焊接工艺的迭代升级,提升船舶制造的质量与效率。

3.2 焊接材料与工艺的系统性协同优化

焊接材料的挑选对于接头性能以及残余应力状态有着直接的影响,传统高强钢进行焊接的时候,大多时候会选用等强匹配的材料,然而高强度的焊缝会加大结构的拘束度,使得残余应力的水平有所提高,当下的研究比较倾向于采用

低匹配或者梯度匹配的材料,借助降低焊缝强度的方式来减少拘束应力,并且利用细晶强化或者第二相强化机制来维持接头的综合性能。比如说,在EH40船用钢焊接过程中,采用低氢型药芯焊丝并配合适当的热输入控制,可让焊缝区的残余拉应力从480MPa降低到320MPa。

新型焊接材料的研发为残余应力的调控给予了全新思路,金属粉芯焊丝凭借对药芯成分加以优化,比如添加Ti、B等微合金化元素,可在焊缝当中形成细小的针状铁素体,在维持接头强度的情况下,把断裂韧性提高到120J以上,使裂纹扩展速率得到延缓,对于铝合金船体结构而言,运用ER5356焊丝并配合MIG焊工艺,借助控制Mg元素的烧损率,使其低于5%,可得到没有气孔、裂纹缺陷的优质接头,残余应力水平相较于传统焊材降低了35%。自保护药芯焊丝的应用可以省去保护气体,适应野外或者封闭舱室的焊接要求,其独特的渣系设计还可在焊缝表面形成压应力层,提高抗疲劳性能。

焊接工艺的创新是降低残余应力的关键手段,激光-电弧复合焊接技术借助高能激光束对母材给予预热,使得电弧能量密度得以提升三至五倍,于30mm厚板对接时达成单面焊双面成形的效果,焊接热输入降低为传统方法的三分之一,残余应力峰值相应降低百分之六十,搅拌摩擦焊即FSW,作为固态焊接技术,完全消除了熔化焊所存在的气孔、裂纹缺陷,其接头疲劳性能相较于MIG焊提升两至三倍,特别适用于铝合金船体结构的制造。针对曲面或者复杂结构而言,机器人协同焊接系统借帮助位混合控制,可实现0.5mm级的轨迹精度,焊接速度、电流、电压等参数需要依据材料厚度、接头形式进行动态调整,举例来说,在薄板焊接过程中,适度提高焊接速度可缩短热作用时间,减少残余应力的积累,而对于厚板,就需要采用多层多道焊,借助控制层间温度来促使氢逸出,避免冷裂纹的生成。

3.3 全生命周期健康监测与智能维护策略

船体结构出现疲劳损伤时会呈现出隐蔽性以及渐进性的特性,传统的定期检修方式很难做到精准维护,借助物联网的智能监测系统可实时收集结构应力、应变以及温度等参数,经过数据融合和特征提取,建立起残余应力松弛、裂纹萌生以及扩展的动态演化模型,光纤光栅也就是FBG传感器由于有抗电磁干扰、耐腐蚀等优点,成为船体监测的理想选择。在关键节点布置分布式FBG阵列,可以达成毫米级空间分辨率的应变测量,联合雨流计数法的疲劳寿命评估模

型,可提前6至12个月预测裂纹萌生的位置,为维修决策提供数据方面的支持。

借助构建涉及几何模型、材料属性以及载荷历史等要素的虚拟船体,可实时呈现物理实体的应力状态以及损伤演化情况,数字孪生系统融合了有限元分析、机器学习算法以及实时监测数据,可针对3000个以上危险节点展开动态评估,提升结构安全性预测的准确率,一旦监测数据与数字模型的偏差超出设定阈值,系统便会自动触发预警机制,同时生成包含维修方案、成本估算以及工期预测等内容的智能报告,达成从“被动维修”至“主动预防”的转变。

对于表面裂纹而言,采用冷压强化以及自动磨粒流复合工艺,可在不拆卸结构件的情况下实现裂纹闭合以及表面强化,处理成本相较于传统焊接修补降低了40%对于深埋裂纹来说,基于相控阵超声也就是PAUT的精准定位技术,可让钻孔止裂孔径从 $\Phi 30\text{mm}$ 减小到 $\Phi 15\text{mm}$ 降低了结构强度损失。增材制造技术在维修领域的应用越来越广泛,凭借激光熔覆或者电弧增材修复裂纹,可实现近净成形加工,减少材料去除量以及热影响区范围,降低维修过程中残余应力的引入,基于断裂力学的Paris公式,结合实际载荷谱与材料S-N曲线,可以建立船体结构疲劳寿命预测模型。借助引入残余应力修正系数,一般取值在0.7-0.9之间,可更准确地反映残余应力对裂纹扩展速率的影响。

4 结语

船体结构焊接残余应力的系统化调控与疲劳寿命提升是一项涉及材料、工艺、监测与维护的综合性工程。通过构建多尺度残余应力调控技术体系、实现焊接材料与工艺的协同优化,以及建立全生命周期健康监测与智能维护策略,可显著降低结构失效风险,延长船舶服役周期。未来,随着数字孪生、人工智能等技术的深度融合,船舶焊接技术将向智能化、绿色化方向加速演进,为海洋装备的高质量发展注入新动能。

参考文献

- [1] 邹江平. 船体结构残余应力的形成与控制[J]. 船舶标准化工程师, 2022, 55 (04): 7-9.
- [2] 屠潭泓. 船体结构焊接变形预测与控制研究[J]. 船舶物资与市场, 2021, 29 (05): 101-102.
- [3] 赵健. 影响船体焊接结构件残余应力的因素及消除方法研究[J]. 无线互联科技, 2020, 17 (01): 139-140.