

船舶结构设计中提高疲劳寿命的维护策略

李露露，庞卫芳

镇江集智船舶科技有限公司，江苏 镇江 212000

摘要：船舶结构的安全性是影响其整个使用寿命的重要因素。由于海洋环境的复杂和不确定，船舶结构所面临的风险相对较大。在船舶结构设计中，疲劳寿命预测和维护策略是保证船舶安全的关键环节，对于确保船舶在复杂海洋环境下安全运行具有重要意义。本文通过深入研究船舶结构设计的要点，分析影响其疲劳寿命的各种因素，并详细介绍在船舶结构设计中预测疲劳寿命的方法。同时探讨在船舶结构设计中如何进行疲劳寿命维护，从而提高船舶的使用寿命和安全性能。

关键词：船舶结构；疲劳寿命；维护策略

Maintenance Strategies for Improving Fatigue Life in Ship Structure Design

Li Lulu, Pang Weifang

Zhenjiang Jizhi Ship Technology Co., LTD. Zhenjiang, Jiangsu 212000

Abstract: The safety of ship structures is an important factor affecting their entire service life. Due to the complexity and uncertainty of the Marine environment, the risks faced by ship structures are relatively large. In the structural design of ships, fatigue life prediction and maintenance strategies are key links to ensure the safety of ships and are of great significance for ensuring the safe operation of ships in complex Marine environments. This paper conducts in-depth research on the key points of ship structure design, analyzes various factors affecting its fatigue life, and elaborates on the methods for predicting fatigue life in ship structure design. Meanwhile, it explores how to carry out fatigue life maintenance in the structural design of ships, so as to improve the service life and safety performance of ships.

Keywords: ship structure; fatigue life; maintenance strategy

引言

优化船只构造的设计对于保证其在运作期间抵御各类外部压力来说至关重要。随着服务期的延长（一般可达二十年），因长时间操作导致船身构件产生持续性的压力，从而引发船体的磨损，削弱其安全性和使用期限。

一、船舶结构疲劳寿命概述

（一）疲劳寿命的定义

船舶结构疲劳寿命是指在特定工作条件下，船舶结构能够承受无数次重复载荷作用而不发生疲劳破坏的寿命。疲劳寿命是船舶结构设计、建造和运营的重要参数，直接关系到船舶的安全性和经济效益^[1]。

（二）疲劳寿命的影响因素

1. 材料特性：船舶结构疲劳寿命与材料本身的抗疲劳性能密切相关。不同材料的疲劳性能差异较大，如不锈钢、铝合金、钛合金等。2. 载荷特性：船舶结构在运行过程中，所承受的载荷具有重复性和复杂性。载荷特性包括载荷大小、载荷频率、载荷波形等。3. 结构形状：船舶结构形状对疲劳寿命也有一定影响。结构形状越复杂，疲劳寿命越低^[2]。4. 环境因素：海洋环境、气候条件、船舶运行速度等环境因素对船舶结构疲劳寿命有显著影响。5. 制造工艺：船舶结构制造工艺对疲劳寿命有重要影响。良好的

制造工艺可以降低残余应力，提高疲劳寿命。

（三）疲劳寿命评估方法

1. 基于经验的疲劳寿命评估：通过分析船舶结构在实际运行过程中的疲劳破坏情况，总结出相应的经验公式，对船舶结构疲劳寿命进行评估^[3]。2. 基于有限元分析的疲劳寿命评估：利用有限元软件对船舶结构进行建模，分析其在不同载荷条件下的应力分布和疲劳寿命。3. 基于实验的疲劳寿命评估：通过疲劳试验，对船舶结构在不同载荷条件下的疲劳寿命进行评估。

二、船舶结构设计中提高疲劳寿命的方法

（一）基本原则

船舶结构设计中的疲劳寿命预测与维护策略深度融合了材料力学特性与工程实践经验，其核心在于构建具备动态适应性的评估体系，既要满足船舶全生命周期内的结构完整性要求，又要兼顾运营成本控制的现实考量。在安全性维度，设计者必须建立基

于非线性损伤累积模型的预警机制，这类模型通过整合波浪载荷谱与材料断裂韧性参数，可精确评估结构节点在交变应力作用下的裂纹萌生阈值——特别是针对焊接接头这类应力集中区，其疲劳寿命往往比母材缩短42%~65%，这要求设计阶段必须采用梯度匹配原则^[4]。

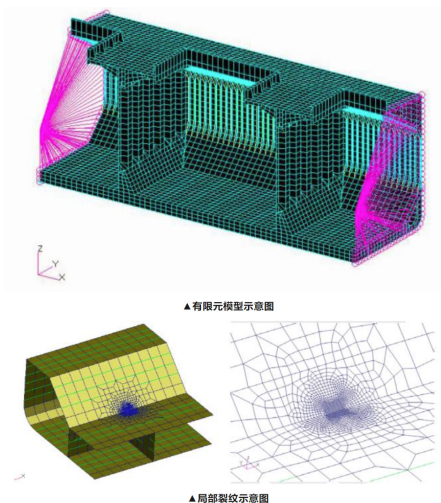
（二）材料选择与匹配

材料匹配策略的本质是建立性能参数的动态平衡，选择合适的材料是提高疲劳寿命的基础。根据船舶船体和其他结构的应用环境和受力特点，选择具有良好疲劳性能的材料，如高强度钢、铝合金、钛合金或复合材料。材料的微观结构，如晶粒大小、相分布和微观缺陷，也会影响其疲劳寿命。通过热处理、冷加工等方法优化材料的微观结构，可以提高其抗疲劳性能^[5]。此外，表面处理技术如喷丸、滚压和涂层，可以引入有利的残余应力分布，提高材料的疲劳强度。在刚度匹配层面，甲板结构采用的5083-H116铝合金与船体钢结构的弹性协调需要精确计算热膨胀系数差异，当温度变化幅度超过30℃时，界面处的应力集中因子会增至1.8~2.3，这直接推动了梯度过渡连接技术的创新应用。耐腐蚀体系的构建则呈现出多层次特征，双相不锈钢的钝化膜自修复能力（点蚀电位可达+1050mV）与有机硅烷涂层的物理屏障作用形成协同效应，使得关键部位的腐蚀速率稳定控制在0.03mm/a阈值之下。在焊接工艺领域，基于热-力耦合效应的数值模拟技术可准确预测不同线能量输入下的HAZ软化程度，当采用低氢型焊条配合多层多道焊技术时，接头区的冲击韧性值可提升至基准材料的85%以上，这种工艺革新显著改善了高强钢焊接结构的疲劳性能图谱。

（三）船舶结构采用合理的结构布局

在船舶结构形式与布局的决策过程中，设计者需要建立多维度的性能映射矩阵，这种映射关系不仅涉及静态力学参数的优化配置，更需考量动态服役环境下的性能衰减轨迹^[6]。单壳体结构作为基础船型的主流选择，其设计优化着重于应力传递路径的拓扑重构——通过计算等效应力云图确定肋骨间距与板材厚度的最佳配比（常规货船肋骨间距多控制在600—800mm区间），这种布局策略能够在降低钢材用量约8%~12%的同时，确保船体梁在遭遇波浪弯矩时的整体挠度不超过L/1500的临界值（L为船长）。双壳体结构的创新应用则源于对破损稳性要求的重新诠释，其内外壳板的协同变形机制需通过弹塑性有限元分析精确把控，特别是在碰撞工况下，当外层板发生屈曲变形吸收约35%~45%的冲击能量时，内层板的应力水平仍能维持在材料屈服强度的70%以下，这种分级耗能设计使得油轮这类高危船型的破损概率降低了60%以上。多壳体结构的技术突破体现在相变材料的创新应用上，某些极地船舶的中间壳体层填充的微胶囊相变材料（相变焓值达220~250kJ/kg），能在-30℃至5℃温域范围内通过潜热吸收有效延缓冰层挤压导致的应力累积，这种结构创新使破冰作业时的结构损伤速率降低了约30%。结构布局的优化本质上是空间利用效率与力学性能的博弈过程，货舱区域的梁格系统设计需要遵循双向弯矩平衡原则——通过调整纵桁与强横梁的截面模量比（通常控制在1:1.2至1:1.5之间），使甲板与船底板在货物载

荷下的相对变形量收敛于3mm/m的许可范围^[7]。机舱布置的独特挑战在于动力设备振动谱与结构固有频率的错峰设计，采用质量调谐阻尼器（总质量占比约0.8%~1.2%）配合局部加强筋布局，可将共振工况下的应力幅值削减至静载工况的40%以下。在稳定性调控层面，压载水舱的拓扑优化需满足惯性矩匹配准则，通过调整舱室分布使横摇固有周期偏离常见波浪周期带（4~8秒）至少20%，这种频率解耦策略能有效降低船舶在4~6级海况下的运动响应幅度。



（四）制造工艺改进

1. 严格控制制造过程中的残余应力

当受到外部力量的影响，物质会出现形变并引发抵抗变形的力——这被称为内力（internal pressure）。单位面积上的内力称为应力，而在焊接过程中形成的此类效应就是“焊接应力”。发生在焊接完成之后留存其中的焊接应力被叫作焊接残余应力。通过对局部加热来实现金属结构焊接，通常让局部金属达到熔化的温度，然后慢慢降温至凝固的状态。在此期间，部分材质需要经历从高温到回落再到上升的反复循环。与此同时，金属会因为冷凝中发生相变产生变化^[8]。

在焊件出现应力的过程中，会同步呈现出伸长、缩短、弯曲、翘曲以及扭转等各类变形情况。变形与应力二者相互关联，倘若在焊接过程中，焊件能够自由地进行伸缩，那么焊接完成后，焊件会产生较大的变形，而焊接残余应力则相对较小；若焊件是在夹具中进行焊接，或者焊件本身具有较大的刚度，使得局部焊接变形极小，也就是在外部约束条件下开展焊接工作时，焊接残余应力将会进一步增大。

在船舶建造领域，焊缝在结构中所处的位置、结构的刚性以及几何尺寸、装配与焊接的先后顺序、焊接电流的大小、焊接速度的快慢以及焊接方向等因素，均会对焊接应力和变形产生极为显著的影响。在实际生产作业中，焊接完成后的结构既会出现一定程度的变形，又会存在一定的焊接残余应力。焊接应力包含瞬时应力和残余应力，其中焊接残余应力又可分为纵向残余应力和横向残余应力。相关试验数据显示，船体钢材具备良好的塑性，焊接残余应力对船体的静载荷强度并无影响^[9]。然而，当因结构和工艺因素导致的局部高应力集中点与结构拉伸的塑性变形区域相

遇时,该尖端处便会产生平面应力,甚至演变为立体应力。特别是在立体应力的作用下,金属的塑性变形会变得更加困难。再加上温度急剧下降,或者处于钢材存在缺陷、焊缝存在缺陷等不利状况时,这个区域就有发生脆裂的可能性。

焊接残余应力的产生会对焊接结构的脆性断裂、疲劳断裂、失稳破坏以及应力腐蚀破坏等方面产生重大影响。降低焊接残余应力可以通过两个主要方向来实现:一是通过优化设计,二是通过调整生产过程。在构件的设计阶段,需要关注其强度的保持、稳固性和成本效益,同时也必须考虑到因设计不当而产生的焊接压力问题。需要注意的是,为了确保结构的强度,应该适当地利用冲压技术;采取较小的焊接标准;缩小焊缝的大小与长度;正确挑选切割角度;防止焊缝过于密集于某个特定区域;并尽力让平行焊缝数量最少^[10];同时,对于等距排列的焊缝,最好将其置于结构中轴线上方,这样能有效避免发生形变或者应力过大;选择结构传力截面和选择焊接接头形式时要尽量使传力线均匀分布,如避免截面尺寸突变,对不同截面的对接接头应尽可能作平缓圆滑过渡。

2. 提高焊接质量

在造船阶段,工厂必须严密遵循生产流程,构建全面的品控体系。对于每一个操作步骤及其结果都要进行核查,以便尽早识别并解决焊接中存在的潜在问题,降低焊接残余应力的影响。针对某些构造可采取如预热法、回火法、局部低温热处理等方法来优化其应力状况。当验收船只时,执行验船师应该对其所有工作终身负责任(尤其是当地船检),仔细审阅相关制程文档、焊接标准表格、外部板展平图及相关构件的设计信息,以保证船体架构能达到规定的强韧度且无过大的焊接残余应力产生的可能。同时,也应对船舶结构设计的合理性和可能引发的焊接应力与形变问题进行深入评估。在实际测试环节,要细致检查船厂钢铁材料的使用情况;对建设过程中的焊接程序和技巧实施适当监管,防止因管理不当导致船体出现大面积的焊接残余应力;对焊接效果的鉴定应从开始到结束全程跟踪,涵盖焊前检查、焊接进程监测和焊后产品验证,找出焊接瑕疵,检测焊接接头性能,评定焊接质量。尤其要加强对高应力区段焊缝的检查力度,务必清除存在的问题和风险。

三、船舶结构设计在提高疲劳寿命的新技术

(一) 复合材料的创新应用

目前玻纤维和碳纤维复合材料在海上能源开发、船舶制造、海洋工程修复领域发挥着巨大的作用;在海洋工程建筑中碳纤维有着很高的优势,碳纤维材料有着较轻的质量,高强度耐腐蚀特性,多以结构件的形式代替传统建筑材料,减轻重量给运费带来的高昂运费、海水侵蚀传统钢筋材料带来的问题。与海水会迅速腐蚀的钢相比,用耐化学性树脂制成的复合材料几乎没有腐蚀。对于平台组件,例如柱管(从平台向下延伸到水面以下以供应海水的管)和消防水系统(用于扑灭潜在火灾的管),这种抗腐蚀性能意味着多年的免维护服务,将大幅提高船舶的疲劳寿命。

(二) 人工智能和数字孪生在船体结构安全评估中的应用

从数字孪生的相关定义和理论解析中可以得出,数字孪生具备以下特征:

- 1) 终极目标是在虚拟环境中建立物理实体的数字化转型。
- 2) 数字化转型的基本需求是保持高度的真实性;
- 3) 实施方法是运用数值模拟技术。
- 4) 主要方式是实体和虚拟环境的数据互动。

对船舶构造来说,传统梁理论、有限元和非线性有限元等方法都提供了不同的模拟模型及计算成果,即前述特性的首项和末项已经具备一定的基础,而当前要完成船舶构造数字孪生的关键任务是提高模拟模型及其仿真效果的精确度。

当前,基于载荷-模型-应力结果的结构安全评估方法被广泛应用。

尽管现阶段的有限元方法被广泛应用于船体结构的安全性能评价中,其精确模拟效果具有高度认可度,然而,由于实际船只的大小及复杂运行条件的影响,这种模拟结果真实性不能完全保证。同时,从数据输入的角度来看,目前船体结构安全性的评估主要依赖于概率理论推算的船舶可承受的最大量化效应负载,这与实际情况中船舶所受负载存在差异,在数值、组合形式和作用形式等方面有很大的不同。

采用波浪监测数据、经数据同化反演的载荷或逆有限元法能够根据极少的测量信息预估船只总体构造中的压力状况,进而对船体架构的坚固性和磨损程度作出评价;使用模拟数据,并配合基于数据驱动的技术,整合过往记录与路线计划,可以推测出裂缝扩张的情况及构件的剩余疲劳寿命。

结语:对于船舶构造的设计来说,疲劳使用期限是一个关键因素,它与船只常规操作的安全性和稳定性有密切关系。为了提升船舶构造的使用年限和性能,需要强化对其使用的预估和研究,改善船舶构造设计的精确度,选择更优质的材质,并增强保养措施,这样可以显著增加船舶构造的耐用期,保证它们能在恶劣海域的环境下正常运作,从而推动中国造船业向着更为稳定的高速增长迈进。

参考文献

- [1] 张捷. 船舶结构可靠性优化设计方法研究 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(8): 56-58.
- [2] 夏镇磊. 船舶焊接与结构设计优化分析 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(11): 8-10.
- [3] 童红兵, 杨忆, 付宗魁. 船舶结构疲劳控制设计数据库的研究 [J]. 舰船科学技术, 2021, 38(4): 37-39.
- [4] 侯文武. 船体结构设计及建造中的细节处理 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(4): 39-41.
- [5] 中国船级社:《船体结构疲劳强度指南》2021版.
- [6] 童乐为; 任珍珍; 景爽; 牛立超. 高强度结构钢系列的疲劳裂纹扩展速率试验研究 [J]. 工程力学, 2020(12).
- [7] 黄维; 高真凤; 丁伟; 陈付红. 我国船板钢现状及技术发展趋势 [J]. 上海金属, 2014(04).
- [8] 王旭亮. 不确定性疲劳寿命预测方法研究 [D]. 南京航空航天大学, 2009.
- [9] 冯国庆. 船舶结构疲劳强度评估方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2006.
- [10] 许一敏; 冷文浩; 周炜; 田志峰; 程成. 船舶折边甲板建模与有限元划分的设计与实现 [J]. 计算机应用与软件, 2013(08).