

深海钻井平台结构疲劳损伤评估与优化设计

储凌霞

江苏现代造船技术有限公司, 江苏镇江, 212001;

摘要: 深海钻井平台作为开发深海油气资源的核心装备, 长期服役于复杂海洋环境, 需承受波浪、海流、风载荷及钻井作业荷载的持续作用, 结构疲劳损伤成为威胁平台安全运行的关键隐患。本文从深海钻井平台结构疲劳损伤的诱发因素切入, 系统阐述疲劳损伤评估的核心方法与技术逻辑, 进而提出基于损伤控制的结构优化设计思路与实施路径。研究旨在为深海钻井平台的安全运维与结构设计提供理论支撑, 提升平台在极端环境下的抗疲劳性能与服役寿命。

关键词: 深海钻井平台; 结构疲劳损伤; 损伤评估; 优化设计; 海洋工程装备

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 12. 079

引言

现在, 全球油气资源开发逐渐向深海推进, 深海钻井平台变得越来越重要。和浅海环境比, 深海区域波浪能量大、海流复杂、温度变化大、作业时间长, 平台结构要长期承受反复变化的荷载。在这种交变荷载的不断冲击下, 平台结构的薄弱地方, 比如焊缝、节点、开孔处, 会慢慢出现微小裂纹。裂纹扩大到一定程度, 就会导致结构疲劳失效, 造成平台损坏, 甚至引发严重安全事故。传统的结构设计大多只看重静态强度, 没充分考虑疲劳损伤, 满足不了深海环境下长期使用的需求。所以, 深入研究深海钻井平台结构疲劳损伤的评估方法和优化设计策略, 对保障深海油气开发安全、推动海洋工程装备技术升级, 是非常关键的。

1 深海钻井平台结构疲劳损伤的诱发因素

深海钻井平台结构出现疲劳损伤, 是环境荷载、结构特性和作业条件共同作用的结果。这些因素相互叠加, 加快了结构疲劳的发展。

1.1 复杂海洋环境荷载

海洋环境荷载是导致平台结构疲劳损伤的主要外部原因, 它具有随机性、周期性和强破坏性。波浪荷载是最主要的动态荷载, 深海巨浪产生的交变力会让平台结构来回振动, 导致结构应力周期性变化; 不同波长、波高的波浪叠加, 会形成不规则荷载, 进一步加大应力波动。海流荷载的动态影响比波浪小, 但会长期作用在平台桩腿、导管架等水下结构上, 引发结构局部湍流和涡激振动, 让结构表面出现交变应力集中。风荷载对平台上部结构, 比如钻井塔、生活模块影响很大, 强风和阵风交替作用, 会让上部结构产生横向和纵向振动, 形成疲劳应力。另外, 高纬度深海区域的海冰荷载和地震活跃带的地震荷载, 虽然不常出现, 但会对结构产生瞬

间强烈冲击, 加快已有微裂纹的扩大。

1.2 结构自身特性缺陷

平台结构自身的几何特点和材料性能缺陷, 是疲劳损伤产生的内在原因。结构几何突然变化的地方, 比如桩腿和导管架的连接节点、构件开孔处、焊缝过渡区域, 容易出现应力集中。在交变荷载作用下, 这些地方的局部应力远高于结构平均应力, 成为疲劳裂纹的发源地。焊缝质量有问题, 比如有气孔、夹渣、没焊透、焊趾咬边等, 会破坏结构的连续性, 降低焊缝区域的材料强度, 同时形成微观应力集中, 加快疲劳损伤发展。材料性能不够也会增加疲劳风险, 如果平台用的材料 (比如高强度钢) 的疲劳强度、韧性和抗裂性达不到深海使用要求, 在长期交变荷载作用下, 材料内部的微观缺陷, 比如晶界空位、位错, 会慢慢发展成宏观裂纹。此外, 深海水腐蚀性很强, 会让结构构件腐蚀, 削弱材料厚度和力学性能, 同时腐蚀产物和应力共同作用产生应力腐蚀, 进一步加快疲劳裂纹扩大。

1.3 钻井作业动态荷载

钻井作业时产生的动态荷载, 会和海洋环境荷载叠加, 加重结构疲劳损伤。钻井时, 钻柱的旋转和来回运动 (起下钻、钻进), 会对钻井塔和平台主体结构产生周期性冲击荷载, 形成交变应力; 钻井液循环系统的压力波动, 也会通过管道传递到平台结构, 引发局部振动。平台的作业荷载还具有随机性和突发性, 比如钻井时出现井涌、井喷等意外情况, 会对平台结构产生瞬间强荷载, 导致结构应力突然升高, 加快已有疲劳损伤的发展。另外, 平台作业时的载荷转移, 比如吊装设备、运输物资, 会改变结构受力分布, 让原本受力不大的区域出现新的应力集中, 形成新的疲劳损伤点。

2 深海钻井平台结构疲劳损伤评估的核心方法

深海钻井平台结构疲劳损伤评估,要按照“分析荷载-计算应力-量化损伤”的步骤来做,准确判断结构的疲劳状态,为后续优化设计提供依据。

2.1 荷载与应力分析方法

分析荷载和计算应力是疲劳损伤评估的基础,需要准确掌握结构在使用期间承受的荷载变化和应力反应。

2.1.1 荷载耦合建模分析

荷载分析用“环境荷载和作业荷载结合建模”的方法。先通过海洋环境观测数据,比如波浪谱、海流速度、风速,建立环境荷载模型;再结合钻井作业的工艺参数,比如钻柱转速、钻井压力、设备重量,构建作业荷载模型。然后用动力学仿真软件(像ANSYS、ABAQUS)把两种荷载结合起来,模拟平台在不同工况下的荷载作用过程。

2.1.2 精细化应力计算

应力计算以有限元分析技术为核心,搭建平台结构的精细有限元模型。把结合后的荷载作为输入条件,计算结构关键部位(节点、焊缝、开孔处)的应力随时间变化的曲线。同时,通过应力集中系数修正,准确算出应力集中部位的局部应力,给后续疲劳损伤分析提供精准的应力数据。

2.2 疲劳损伤量化评估方法

疲劳损伤量化评估,是通过建立应力和疲劳损伤的联系,计算结构在使用期间累积的疲劳损伤。

2.2.1 Miner 线性累积损伤评估

Miner 线性累积损伤理论是最常用的评估方法。它认为结构在不同应力水平下的疲劳损伤可以叠加。先把应力时程曲线拆成不同幅值的应力循环,再结合材料的S-N曲线(应力-寿命曲线),算出每个应力循环对应的损伤值,然后把所有损伤值加起来,得到总累积疲劳损伤。当总损伤值达到1时,说明结构发生疲劳失效。

2.2.2 断裂力学评估方法

如果结构存在应力集中和裂纹扩展,就要用断裂力学评估方法。通过计算裂纹尖端的应力强度因子,结合材料的断裂韧性和裂纹扩展速率公式,预测裂纹从出现到失稳扩展的寿命,量化裂纹扩展过程中的疲劳损伤程度。

2.2.3 概率疲劳评估方法

考虑到深海环境的不确定性,还要用概率疲劳评估方法。通过统计分析荷载、材料性能、几何参数的随机分布,计算结构在不同置信度下的疲劳寿命和损伤概率,让评估结果更可靠。

2.3 损伤检测与监测技术

损伤检测和监测技术,是验证评估结果、实时掌握结构疲劳状态的关键手段。

2.3.1 离线损伤检测技术

离线检测技术是定期对平台结构做无损检测,比如超声波检测、射线检测、磁粉检测,找出结构表面和内部的疲劳裂纹、焊缝缺陷等损伤。用无人机巡检平台上部结构,用水下机器人(ROV)探测水下结构,全面获取损伤的位置、尺寸和形态数据,修正疲劳损伤评估模型。

2.3.2 在线损伤监测技术

在线监测技术是在平台关键结构部位(应力集中区域、焊缝节点)安装传感器,比如应变传感器、振动传感器、裂纹监测传感器,实时收集结构应力、振动频率、裂纹扩展等数据。结合物联网和大数据技术,搭建疲劳损伤监测平台,对监测数据实时分析和预警。当结构损伤达到预设阈值时,及时发出警报,指导维修作业,实现疲劳损伤的动态评估和风险管控。

3 深海钻井平台结构优化设计的实施路径

深海钻井平台结构优化设计,核心目标是“减少疲劳损伤、提高抗疲劳能力”,从结构形态、材料选择、工艺改进和运维优化四个方面,建立综合优化体系。

3.1 结构形态与拓扑优化

通过优化结构的几何形状和部件布局,减少应力集中,降低疲劳荷载对结构的影响。

3.1.1 结构拓扑优化

结构拓扑优化要用到拓扑优化算法,比如变密度法、水平集法。在保证平台能承受荷载、满足空间布局要求的前提下,去掉结构中多余的材料,优化构件的分布和连接方式,让结构受力更均匀,避免局部应力过大。比如,对导管架的节点进行重新设计,用平滑过渡的节点代替传统的直角连接节点,降低节点处的应力集中系数。

3.1.2 结构几何形态优化

几何形态优化时,对桩腿、立柱等主要受力构件采用变截面设计。在应力大的地方加大截面尺寸,应力小的地方减小截面尺寸,做到“按需材料”;对结构上的开孔处,用圆角过渡或加加强环的设计,分散开孔处的集中应力。同时,优化平台整体的刚度分布,让结构自身的振动频率避开波浪、海流的主要振动频率,减少共振现象,降低动态应力的大小。

3.2 材料与防腐技术升级

选择高性能材料、优化防腐技术,提高结构的抗疲劳和抗腐蚀能力,减缓疲劳损伤的发展。

3.2.1 高性能材料选用

材料选择上,推广使用深海专用的高强度耐疲劳钢,比如 EH47、EH55 级海洋工程钢。这类钢材疲劳强度高、韧性好、抗裂能力强,能承受深海复杂的交变荷载;同时,用复合材料(像碳纤维增强复合材料、玻璃纤维增强复合材料)替换部分金属构件。复合材料重量轻、强度高、耐腐蚀、抗疲劳,能有效减轻结构重量,降低疲劳损伤风险。

3.2.2 复合防腐技术应用

防腐技术方面,采用“涂层防腐+阴极保护”的复合防腐方法。在结构表面刷上耐海洋腐蚀的重防腐涂料,比如环氧树脂涂料、聚脲涂料,隔绝海水和结构的接触;对水下结构采用牺牲阳极阴极保护或外加电流阴极保护,阻止海水腐蚀金属。另外,在焊缝、节点等容易腐蚀的部位,用耐腐蚀合金(比如镍基合金)进行局部堆焊,提高这些部位的抗腐蚀和抗疲劳能力。材料选用时,需通过室内试验与海洋环境模拟测试,验证材料的耐疲劳性能与环境适应性。

3.3 施工工艺与质量管控

优化施工工艺、加强质量控制,减少结构施工时的缺陷,从源头降低疲劳损伤风险。

3.3.1 施工工艺优化

焊接工艺优化上,用自动化焊接技术(比如埋弧焊、气体保护焊)代替手工焊接,提高焊缝的成型质量和一致性;对焊趾部位进行打磨、锤击或激光冲击处理,消除焊趾咬边等缺陷,降低焊趾处的应力集中系数;控制焊接时的热量输入,减少焊接产生的残余应力,避免残余应力和工作应力叠加,加重疲劳损伤。

3.3.2 全流程质量管控

质量管控上,建立覆盖全程的质量检测体系。原材料进场时,检测力学性能、化学成分等;焊接过程中,实时监控焊接电流、电压、温度;结构完工后,用无损检测(比如焊缝探伤、复核结构尺寸)检查质量。同时,加强施工人员培训,提高操作技能和质量意识,确保施工严格按设计要求进行,避免因施工缺陷引发疲劳损伤。施工过程中,针对深海作业的特殊性,需优化施工设备与工艺的适配性。比如,采用水下焊接机器人完成水下结构的自动化焊接,避免人工水下作业的精度误差与安全风险;在高空焊接作业中,使用防风防雨焊接防护棚,减少恶劣天气对焊接质量的影响,保障焊缝的抗疲劳性能。

3.4 运维与损伤修复优化

优化运维策略、改进损伤修复技术,实现对疲劳损

伤的动态管理,延长平台的使用年限。

3.4.1 运维策略优化

运维策略上,根据疲劳损伤评估结果和在线监测数据,制定差异化的运维计划。对桩腿节点、钻井塔底部等疲劳损伤风险高的部位,增加检测次数;用状态检修代替定期检修,根据结构实际的疲劳情况安排维修,避免维修过多或不足。

3.4.2 损伤修复技术革新

损伤修复方面,对早期的微裂纹,用激光熔覆、超声冲击等无损修复技术。通过激光能量熔合微裂纹,或用超声振动消除应力,阻止裂纹扩大;对已经扩大的宏观裂纹,用焊接修复(比如补焊、塞焊)或复合材料补强(比如粘贴碳纤维布)的技术,恢复结构的强度和刚度。修复时要严格控制工艺,避免产生新的应力集中或工艺缺陷,确保修复后的结构抗疲劳性能满足使用要求。运维阶段,可引入数字孪生技术,构建平台结构的虚拟映射模型,将在线监测数据实时导入模型,模拟疲劳损伤的发展趋势,提前预判潜在风险。同时,建立损伤修复案例库,记录不同损伤类型、修复工艺的实际效果,为后续类似损伤的快速处理提供参考,提升运维效率与修复质量。

4 结语

深海钻井平台结构疲劳损伤评估与优化设计,是保障深海油气开发安全、提升海洋工程装备可靠性的核心技术环节。疲劳损伤的诱发因素涉及环境、结构、作业多维度,评估需通过荷载耦合分析、损伤量化计算与实时监测相结合的方法,实现精准判断;优化设计则需从结构形态、材料工艺、运维管理多层面入手,构建全生命周期的疲劳损伤控制体系。未来,随着深海开发向更深、更复杂的海域推进,需进一步融合智能化技术(如数字孪生、人工智能),构建“实时监测-动态评估-智能优化-精准修复”的一体化管理平台,持续提升深海钻井平台的抗疲劳性能与服役安全性,为全球深海油气资源的高效开发提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 胡强. 海洋钻井平台井架承载能力分析和优化措施[J]. 装备制造技术, 2023, (04): 169-173.
- [2] 李至立, 却立勇, 刘兴惠. 基于 DNN 的半潜式平台系统稳定性预测模型[J]. 中国海洋平台, 2022, 37 (02): 33-38.
- [3] 宋光立, 刘军波, 王毅. 大水深自升式钻井平台隔水导管稳定性及安全性分析[J]. 机械工程师, 2022, (02): 44-46+49.