

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，深海海水腐蚀性强，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“按需用材料”；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，确保施工严格按照设计要求进行，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):3-38.
- [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.