

海洋腐蚀环境下固定式平台钢结构疲劳损伤演化规律研究

王 瑞 刘静蕊

瀚辰能源有限公司 天津 300000

摘 要：固定式海洋平台钢结构长期服役于高盐雾、潮汐与风浪耦合的恶劣腐蚀环境，疲劳损伤演化机理较常规环境更为复杂。本文基于腐蚀电化学与疲劳断裂力学理论，分析了腐蚀环境对钢结构疲劳性能的劣化机制，建立了考虑蚀坑应力集中与有效截面损失的腐蚀疲劳损伤演化模型。通过室内加速腐蚀与疲劳试验，获取了不同腐蚀周期下试件的疲劳性能退化规律及裂纹萌生-扩展特征。结果表明，腐蚀环境下钢结构疲劳寿命随腐蚀时间呈指数衰减，蚀坑形态与分布是损伤演化的关键控制因素。研究成果可为海洋平台钢结构腐蚀疲劳寿命评估与维护决策提供理论依据。

关键词：海洋腐蚀环境；固定式平台；钢结构；腐蚀疲劳

引言：固定式海洋平台是海上油气资源开发的核心基础设施，其钢结构长期承受波浪、海流、冰载等交变载荷，同时面临海水腐蚀与海洋大气侵蚀的双重威胁。随着我国大量海洋平台进入设计寿命后期，腐蚀疲劳损伤问题日益凸显，已成为制约平台延寿服役安全的关键瓶颈。当前工程实践中对腐蚀疲劳的评估多采用基于大气环境数据的简化方法，未能充分考虑海洋腐蚀环境的特殊性及其与疲劳载荷的耦合效应。本文通过理论与试验相结合，系统研究海洋腐蚀环境下平台钢结构的疲劳损伤演化规律，旨在为平台结构安全评估提供更为精确的理论依据。

1 海洋腐蚀环境下钢结构疲劳损伤理论基础

1.1 海洋腐蚀环境特征与作用机理

海洋腐蚀环境是一个多因素耦合的复杂腐蚀体系，其腐蚀性远高于一般大气环境。根据国际标准 ISO 12944，海洋大气环境被归类为最高腐蚀性等级。对于固定式平台而言，钢结构所处环境可沿水深方向划分为大气区、飞溅-潮差区和全浸区三个典型区带。其中，飞溅-潮差区因供氧充分、干湿交替频繁、表面盐分浓缩，腐蚀速率最高，每年腐蚀深度可达 0.3 至 0.5 毫米，是全浸区的 3 至 5 倍。不同区带的腐蚀形态各有侧重：大气区以均匀腐蚀与点蚀为主，飞溅区点蚀与冲蚀协同作用显著，全浸区则以均匀腐蚀和微生物影响腐蚀为主。这一分区特征决定了不同位置钢结构疲劳损伤的初始状态与发展路径存在本质差异。

1.2 腐蚀对钢结构疲劳性能的劣化机理

腐蚀对钢材疲劳性能的劣化涉及微观至宏观的多层

次作用。微观层面，氯离子穿透保护膜后在材质缺陷处形成点蚀核，交变应力下蚀坑底部产生显著应力集中，使局部塑性变形提前累积，加速滑移带形成。中观层面，多个蚀坑相互作用改变局部应力场，相邻蚀坑塑性区重叠促进裂纹早期连接。宏观层面，腐蚀导致有效承载截面减小、实际应力升高，同时腐蚀产物在裂纹尖端产生附加应力，降低扩展阻力^[1]。三者叠加使腐蚀环境下钢结构疲劳强度较空气环境显著下降。

1.3 腐蚀疲劳损伤演化理论

基于损伤力学理论，可将腐蚀疲劳总损伤理解为循环载荷造成的损伤与腐蚀作用造成的损伤相互叠加、相互促进的结果。在裂纹萌生阶段，点蚀深度随时间呈非线性增长，蚀坑底部受力状态随蚀坑加深而不断恶化，当恶化程度超过材料疲劳萌生阈值时即转入裂纹扩展阶段。在扩展阶段，传统的疲劳裂纹扩展规律需要引入腐蚀环境的加速效应进行修正，且这种加速效应随腐蚀时间延长而非线性增强。传统的线性累积理论将腐蚀仅视为对疲劳强度的单一折减，但大量试验表明腐蚀疲劳损伤累积具有显著的非线性特征——腐蚀不仅降低了材料初始的疲劳抗力，还改变了损伤累积的速率，需要采用更为复杂的耦合模型才能准确描述。

2 腐蚀环境下钢结构疲劳性能退化试验研究

2.1 试验材料与方案设计

试验材料选用海洋平台结构常用钢材 Q355D，其屈服强度为 355 兆帕，抗拉强度为 470 至 630 兆帕。试件按照国家标准设计为标准圆棒疲劳试件，工作段直径为 10 毫米，并加工一批含预制人工缺陷的试件用于裂纹扩

展试验。腐蚀介质采用质量分数为 3.5% 的氯化钠溶液模拟海水环境。加速腐蚀试验采用周期浸润法, 每个循环包括浸润 5 分钟、干燥 25 分钟, 以模拟飞溅区干湿交替的实际条件。腐蚀周期设 4 个时间水平: 0 天、30 天、90 天和 180 天。腐蚀完成后对试件进行表面形貌观察、蚀坑三维轮廓扫描和截面金相分析, 随后开展高周疲劳试验和裂纹扩展速率试验, 获取不同腐蚀周期下的疲劳性能退化数据。

2.2 腐蚀形貌演化与蚀坑特征分析

经不同周期腐蚀后, 试件表面形貌呈现显著的阶段性演化特征。腐蚀 30 天时, 表面出现分散的点蚀坑, 直径约 50 至 150 微米, 深度约 20 至 50 微米, 形态以半球形为主。腐蚀 90 天时, 蚀坑密度显著增加, 部分相邻蚀坑开始连接, 蚀坑深度增至 80 至 150 微米, 边缘出现明显的棱角状特征, 局部可见微裂纹萌生。腐蚀 180 天时, 表面出现大面积腐蚀产物覆盖层, 去除后可见蚀坑进一步加深贯通, 形成尺寸达 300 至 500 微米的不规则腐蚀面, 最大蚀坑深度超过 200 微米。统计分析表明, 蚀坑深度和直径均呈现极值分布特征, 最大蚀坑深度随腐蚀时间延长呈非线性增长趋势, 蚀坑底部曲率半径随腐蚀时间不断减小, 由此引起的应力集中效应显著增强^[2]。

2.3 腐蚀对疲劳强度的影响

高周疲劳试验结果揭示了腐蚀作用对疲劳性能的显著衰减效应。在试验条件保持一致的前提下, 未腐蚀试件的疲劳极限约为 285 兆帕。腐蚀 30 天后疲劳极限下降约 14%; 腐蚀 90 天后下降达 32%; 腐蚀 180 天后下降高达 46%。从整体趋势看, 腐蚀不仅降低了疲劳极限, 还使高应力区域的寿命衰减更为剧烈。在相同应力幅条件下, 未腐蚀试件寿命超过百万次循环, 而腐蚀 180 天试件寿命已降至数十万次量级, 衰减幅度超过 80%。疲劳极限与最大蚀坑深度之间存在良好的负相关关系, 即蚀坑越深、尺寸越大, 疲劳极限越低, 这一关系为基于腐蚀坑检测结果估算剩余疲劳强度提供了简便可行的工程途径。

2.4 裂纹萌生与扩展演化特征

通过扫描电子显微镜对断口进行观察, 清晰识别出腐蚀疲劳裂纹从萌生到扩展的全过程特征。腐蚀试件的疲劳裂纹几乎全部萌生于蚀坑底部, 这与蚀坑底部显著的应力集中和局部电化学活性增强密切相关。未腐蚀试件的裂纹萌生阶段占总寿命的四分之三以上, 而腐蚀 180 天试件的萌生阶段占比降至不足一半, 表明腐蚀显著缩短了裂纹萌生过程。裂纹扩展路径方面, 腐蚀环境下裂

纹呈现沿晶体边界与穿越晶体两种模式的混合扩展, 表面可见腐蚀产物沉积和二次裂纹分支。裂纹扩展速率测试显示, 在相同受力条件下, 腐蚀 180 天试件的扩展速率约为未腐蚀试件的近三倍, 证实腐蚀显著加速了裂纹扩展过程。

3 腐蚀疲劳损伤演化规律与模型建立

3.1 腐蚀疲劳损伤演化阶段划分

基于试验观察, 可将海洋腐蚀环境下钢结构疲劳损伤演化过程划分为四个特征阶段。第一阶段为腐蚀孕育期: 钢材表面保护膜在氯离子作用下局部破裂形成点蚀核, 以电化学腐蚀为主导, 机械载荷影响较小。第二阶段为蚀坑发展期: 点蚀坑持续加深扩展, 应力集中逐渐增大, 在交变载荷共同作用下蚀坑底部出现循环滑移带, 结束标志为出现可识别的微裂纹。第三阶段为裂纹萌生与短裂纹扩展期: 微裂纹沿滑移面扩展并与相邻蚀坑连接, 裂纹从微观尺度扩展至可观尺度, 该阶段对腐蚀环境最为敏感。第四阶段为长裂纹扩展至断裂期: 裂纹长度超过微观结构特征尺寸后, 由力学驱动力主导扩展, 直至剩余截面不足以承受峰值载荷而发生最终断裂。

3.2 蚀坑-裂纹转化机理与临界条件

蚀坑向裂纹转化是腐蚀疲劳损伤演化中最关键的转折点, 其机理可归结为蚀坑底部局部应力场与腐蚀环境的协同突破效应。从应力场角度分析, 蚀坑作为三维表面不连续体, 在远场交变应力下产生局部应力集中, 当蚀坑深度与口径之比达到一定程度时, 应力集中系数可达 3.5 以上, 局部应力远超材料屈服极限, 循环塑性累积使材料内部结构发生不可逆变化, 最终演化为微观裂纹。从临界条件看, 当蚀坑深度超过某一阈值 (约 50 至 80 微米), 且蚀坑底部的局部受力状态超过材料疲劳极限所对应的临界状态时, 即满足裂纹萌生条件^[3]。在腐蚀环境中, 这一临界蚀坑深度随腐蚀时间延长而减小, 意味着腐蚀越久, 裂纹越容易萌生。

3.3 腐蚀-疲劳耦合损伤演化规律

基于前述试验观察与数据分析, 可将腐蚀与疲劳的耦合效应归纳为分阶段的累积损伤过程。在服役初期, 腐蚀损伤以点蚀形成为主, 最大蚀坑深度随暴露时间呈非线性增长, 此时疲劳载荷对蚀坑发展的促进作用尚不显著。随着蚀坑深度不断增大, 其底部应力集中效应急剧增强, 当蚀坑达到临界尺寸后, 疲劳裂纹在蚀坑底部开始萌生。在这一阶段, 腐蚀环境的持续作用使裂纹萌生所需的循环次数随腐蚀时间的延长而呈指数规律缩短, 即腐蚀暴露越久, 裂纹越早出现。进入裂纹扩展阶

段后,腐蚀介质的楔入效应和裂纹尖端阳极溶解的协同作用,使裂纹扩展速率显著加快,且这种加速效应随腐蚀时间累积而不断增强。总体而言,腐蚀疲劳总寿命由裂纹萌生寿命与扩展寿命两部分构成,腐蚀对前者的大幅压缩是导致总寿命衰减的主要原因,而扩展阶段的加速进一步加剧了这一趋势。

3.4 模型验证与参数分析

将所建模型的预测结果与独立批次试验数据进行对比验证。在中等应力幅、腐蚀 90 天条件下,实测寿命均值与模型预测值偏差约 6%;腐蚀 180 天条件下偏差约 9%。在较高应力幅、腐蚀 90 天条件下偏差约 10%。总体而言,模型预测偏差控制在 10% 以内,验证了模型的有效性。参数分析表明,预测结果对腐蚀加速效应相关参数最为敏感,这些参数的变化会显著影响寿命预测结果,而时间指数的影响相对较小。因此,工程应用中准确标定关键参数是提高腐蚀疲劳寿命预测精度的关键,建议通过现场挂片试验或加速腐蚀试验获取特定海域的环境参数。

4 工程应用与维护策略

4.1 基于腐蚀疲劳寿命评估的平台检修周期优化

将损伤演化模型应用于检修周期的科学确定,具体应用路径为:针对平台不同区域的钢结构,依据环境分区确定相应的腐蚀速率参数;基于设计载荷谱计算各部位的实际受力水平;代入模型计算不同服役时刻的累积损伤程度和剩余寿命;以设定的损伤阈值确定首次检修时间和后续检修间隔。根据模型计算结果,飞溅区关键节点建议首次无损检测设在服役后第 8 至 10 年,之后每 5 至 6 年复检一次;大气区可延长至 12 至 15 年首次检测,复检间隔 8 至 10 年。这一差异化检修策略比传统均匀周期更加科学合理,既不会因过度检修造成资源浪费,也不会因检修不足导致安全隐患。

4.2 腐蚀疲劳关键部位的检测与监测方法

建立多层次的检测监测技术组合方案。第一层次为宏观普查,采用目视检查与超声波测厚相结合,每半年执行一次,对全平台钢结构进行腐蚀减薄状况的初步筛查。第二层次为精细检测,对飞溅区关键节点和应力集中部位采用先进电磁场检测技术或相控阵超声技术检测表面及近表面裂纹,检测精度可达毫米级,每年安排一次^[4]。第三层次为在线监测,在关键承载构件上安装腐蚀监测探头和光纤应变传感器,实时采集腐蚀速率与应力数据,实现损伤演化的动态追踪。推荐在平台设计阶

段即嵌入监测系统,将传感器与结构同步安装,避免后期加装的高昂成本与施工困难。

4.3 海洋平台钢结构腐蚀疲劳防控建议

从材料选择、环境控制和载荷管理三个维度协同施策。材料维度上,新建平台可选用耐蚀性能更优的钢材或在关键部位堆焊不锈钢覆层,对既有结构可采用热喷涂铝或锌铝复合涂层进行防护,涂层厚度建议不低于 200 微米。环境维度上,飞溅区是腐蚀疲劳最危险的区带,应作为防护的重中之重,推荐采用包覆防护技术形成物理隔离层,阻断氯离子与钢材表面的直接接触,该技术已在渤海部分平台获得成功应用。载荷维度上,通过优化平台运行管理降低交变载荷的幅值与频次,如合理控制甲板堆载、避免非计划停机引起的载荷冲击等。同时建立腐蚀疲劳数据库,将每次检测数据与检修记录纳入统一管理平台,通过数据积累不断修正评估模型参数,使腐蚀疲劳管理从一次性评估走向全生命周期动态管理。

结束语

本文通过理论分析与试验研究相结合,系统揭示了海洋腐蚀环境下固定式平台钢结构疲劳损伤的演化规律。腐蚀对疲劳性能的劣化表现为蚀坑应力集中与有效截面减小的双重效应,疲劳强度随腐蚀时间呈显著衰减;蚀坑向裂纹的转化是损伤演化的关键转折;所建分阶段耦合损伤演化模型预测精度良好,可为腐蚀疲劳寿命评估提供理论工具。需要指出的是,室内加速试验与真实海洋环境长期暴露效应尚有差异,后续应结合实海挂片数据修正模型参数,并进一步探索变幅载荷下腐蚀疲劳累积损伤的非线性规律。

参考文献

- [1] 何雪,康泽州,严基,等. 海洋环境下耐候钢十字非传力焊接接头腐蚀疲劳性能试验研究 [J]. 世界桥梁,2023,51(3):96-104.
- [2] 魏欢欢,陈晨,郑东东,等. 海洋腐蚀环境下高强度钢材研究现状及发展趋势 [J]. 人民珠江,2023,44(8):82-92.
- [3] 钟振坤,关蕾,傅汉龙,等. 模拟海洋大气环境下冲刷载荷对 Q355 钢的腐蚀规律研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报,2026,46(3):717-729.
- [4] 高燕,任思明,刘成宝,等. 涂层/钢结构腐蚀与耐久性评价中的微区电化学实验研究 [J]. 宁波工程学院学报,2021,33(1):13-20.