

Analysis and prediction model of critical conditions of stress corrosion cracking of 316L stainless steel in seawater medium

Qiang Li

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

This study explores the mechanisms and critical conditions of stress corrosion cracking (SCC) in 316L stainless steel in seawater environments, revealing the electrochemical-mechanical coupling failure mechanism under the combined effects of anodic dissolution and hydrogen embrittlement. Environmental parameters, material properties, and stress states are identified as the primary influencing factors, with their interactions exhibiting significant nonlinear characteristics. A predictive model is developed through multi-parameter coupling analysis, proposing a comprehensive protective strategy that includes environmental regulation, material optimization, and stress management. In practical applications, it is essential to integrate critical stress thresholds and corrosion kinetics parameters, achieving multi-dimensional prevention and control through optimized welding processes, surface modification, and online monitoring, thereby providing theoretical support for SCC risk assessment and life prediction of marine equipment.

Keywords

stainless steel; stress corrosion cracking; protection

海水介质 316L 不锈钢应力腐蚀开裂的临界条件分析与预测模型

李强

中广核核电运营有限公司, 中国 · 广东 深圳 518000

摘 要

探讨海水介质中316L不锈钢应力腐蚀开裂机理及临界条件, 揭示阳极溶解与氢脆协同作用下的电化学-力学耦合失效机制。环境参数、材料特性及应力状态被确认为主导因素, 其交互作用呈现显著非线性特征。基于多参数耦合分析构建预测模型, 提出环境调节、材料优化与应力管理的综合防护策略。工程应用需结合临界应力阈值与腐蚀动力学参数, 通过焊接工艺优化、表面改性及在线监测实现多维防控, 为海洋装备的SCC风险评估与寿命预测提供理论支撑。

关键词

不锈钢; 应力腐蚀开裂; 防护

1 引言

海洋环境中 316L 不锈钢的应力腐蚀开裂行为严重威胁海洋装备服役安全, 其临界条件受环境、材料及应力状态多重耦合作用。海洋大气环境下金属材料的腐蚀控制是保障海洋工程装备服役安全的核心挑战。随着我国“海洋强国”战略推进, 南海、东海等热带海域的装备腐蚀失效问题日益凸显。海洋工程装备的服役寿命与可靠性高度依赖于关键连接件的耐蚀性能。316L 不锈钢因其优异的耐蚀性和力学性能, 被广泛应用于海洋工程领域。然而, 在湿热、高盐雾、强辐

照的热带海洋大气环境中, 316L 不锈钢仍面临严重的局部腐蚀风险。

2 应力腐蚀开裂机理

2.1 阳极溶解机制

阳极溶解机制作为应力腐蚀开裂的核心机理之一, 其本质是金属在特定环境与应力协同作用下的电化学腐蚀过程。在海水介质中, 316L 不锈钢表面因氯离子侵蚀破坏钝化膜, 暴露出活性金属基体, 形成局部微电池。阳极区域发生金属原子电离, 电子通过基体传导至阴极区参与氧还原反应, 构成自催化溶解循环。该过程受环境因素显著影响: 氯离子浓度升高会加速钝化膜破裂, 而溶解氧含量则直接关联阴极反应速率。应力作用通过促进位错运动加剧阳极溶解,

【作者简介】李强 (1989–), 中国湖北咸宁人, 本科, 工程师, 从事静止机械密封研究。

一方面使新生裂纹尖端持续暴露于腐蚀环境，另一方面导致局部应变集中区成为优先溶解通道。值得注意的是，阳极溶解主导的 SCC 通常表现为沿晶或穿晶裂纹形貌，裂纹扩展路径与晶界析出相或局部应变分布密切相关。实验研究表明，当阳极溶解速率超过临界阈值时，裂纹尖端难以通过再钝化实现自修复，最终导致材料失稳断裂。

2.2 氢脆开裂机制

氢脆开裂机制是海水介质中 316L 不锈钢应力腐蚀开裂的另一重要机理，其核心在于氢原子在应力作用下的扩散与富集行为。在腐蚀环境中，阴极反应生成的氢原子可吸附于金属表面，部分氢原子渗透进入金属晶格。这些氢原子在应力梯度驱动下向拉应力区迁移，并在晶界、夹杂物或位错等缺陷处聚集形成氢分子，产生局部高压导致微裂纹萌生。316L 不锈钢的奥氏体组织虽具有较低氢扩散系数，但应变诱导马氏体相变会显著提高氢脆敏感性。氢原子还通过降低原子键结合能或促进位错运动等方式削弱材料力学性能。氢脆主导的 SCC 裂纹通常呈现沿晶特征，裂纹扩展速率与环境氢浓度、材料氢陷阱密度及应力水平呈正相关。需特别指出，该机制与阳极溶解机制存在本质差异：氢脆裂纹尖端无明显腐蚀形貌，且裂纹扩展具有突发性，在表观应力强度因子远低于材料断裂韧性时即可能发生失稳断裂。

2.3 协同作用

协同作用是海水介质中 316L 不锈钢应力腐蚀开裂过程中阳极溶解机制与氢脆开裂机制共同作用的结果。两种机制并非独立存在，而是相互促进，形成正反馈循环。阳极溶解导致裂纹尖端局部酸化，促进氢离子还原反应，增加氢原子渗透量；同时，氢原子在金属内部的富集又降低了局部区域的断裂韧性，加速裂纹扩展。应力作用不仅为氢原子扩散提供驱动力，还通过塑性变形破坏钝化膜，加剧阳极溶解过程。在协同作用下，裂纹扩展速率显著高于单一机制主导的情况。316L 不锈钢的奥氏体-马氏体相变区域尤其容易成为协同作用的敏感区，相变产生的微观应变场既促进氢原子聚集，又加速局部阳极溶解。值得注意的是，协同作用的强度与环境参数密切相关：氯离子浓度升高会强化阳极溶解组分，而阴极极化则可能增强氢脆组分。这种机制耦合使得 SCC 行为呈现复杂的非线性特征，单纯基于单一机制的预测模型往往难以准确描述实际失效过程。

3 影响 SCC 的关键因素

3.1 环境

环境因素是影响海水介质中 316L 不锈钢应力腐蚀开裂（SCC）行为的关键变量。海水中的氯离子浓度直接影响钝化膜的稳定性，高浓度氯离子促进局部腐蚀坑的形成，为裂纹萌生提供优先位置。溶解氧含量通过调控阴极反应速率影响腐蚀进程，而 pH 值的变化则可能改变金属表面膜的化学

组成。温度升高通常会加速腐蚀反应动力学，同时促进氢原子扩散。海水流速对 SCC 的影响具有双重性：适度流速可减少腐蚀产物沉积，但过高流速可能导致冲刷腐蚀。此外，海洋生物附着可能形成氧浓差电池，加剧局部腐蚀。需特别注意的是，环境因素的协同效应往往比单一因素影响更为显著，如高温与高氯离子浓度的组合会显著降低材料的 SCC 抗力。在实际海洋环境中，这些参数通常呈现动态变化特征，使得环境因素的量化评估变得尤为复杂。

3.2 材料

材料特性是决定 316L 不锈钢在海水介质中抗应力腐蚀开裂（SCC）性能的内在因素。该材料的化学成分波动，特别是钼、镍等合金元素含量的微小变化，直接影响钝化膜的稳定性与自修复能力。晶界碳化物析出会形成局部微电偶，增加晶间腐蚀敏感性；而 δ 铁素体相的存在可能改变氢扩散路径。冷加工导致的位错密度升高既可能通过应变诱导马氏体相变促进氢脆，又可能因残余应力加剧局部阳极溶解。表面状态同样关键，机械加工产生的表面缺陷可能成为裂纹优先形核位点，而适当的表面处理可改善耐蚀性。值得注意的是，微观组织均匀性对 SCC 抗力具有重要影响，偏析带或夹杂物聚集区往往成为腐蚀扩展通道。材料批次间的性能差异主要源于冶炼工艺参数波动，这导致相同环境条件下可能出现不同的 SCC 行为。热处理制度通过调控相组成和晶界特征，进一步影响材料在腐蚀环境中的长期服役表现 [1]。

3.3 应力状态

应力状态是影响 316L 不锈钢在海水介质中应力腐蚀开裂（SCC）行为的重要力学因素。施加应力水平必须超过特定阈值才能引发 SCC，该阈值与材料强度和環境腐蚀性密切相关。应力集中现象尤为关键，结构不连续处如缺口、焊缝等部位的局部应力增强会显著降低 SCC 临界条件。动态载荷比静态应力更具破坏性，循环应力作用会加速裂纹扩展速率。残余应力作为初始应力场的重要组成部分，焊接或冷加工产生的残余拉应力可能使材料在无外载情况下仍发生 SCC。值得注意的是，应力方向与晶粒取向的关系影响裂纹扩展路径，沿特定晶向的应力作用会促进穿晶或沿晶开裂。多轴应力状态比单轴应力更易诱发 SCC，主应力比值的变化会改变裂纹尖端应力强度因子。应力作用时间同样重要，长期低应力作用可能通过蠕变-腐蚀交互作用导致延迟开裂。应力状态的这些特征使得 SCC 预测必须综合考虑静态与动态载荷、残余应力以及局部应力集中效应。

4 SCC 的防护改进

4.1 环境调节

介质改性是降低 316L 不锈钢在海水环境中应力腐蚀开裂风险的有效途径。通过添加缓蚀剂可改变溶液化学性质，如硝酸盐等氧化性物质能促进钝化膜修复，而硫代硫酸盐等