

Research on Corrosion Behavior and Evolution Law of Q355b Steel under Stress

Yirui Li Yongqi Dai

Shandong Jiaotong University, Jinan, Shandong, 250357, China

Abstract

The service environment of port engineering steel structures is harsh, with corrosion being a key factor affecting their service life. This study investigates the effects of different stress levels and corrosion exposure times on the corrosion process of Q355b steel specimens subjected to neutral salt spray testing. By combining macroscopic morphology analysis, quantitative characterization using a 3D optical profilometer, and the weight loss method, the results demonstrate that: Under identical exposure times, applied stress significantly accelerated the formation of corrosion pits and made the overall corrosion morphology more complex. As the corrosion time increased, the corrosion rate tended to stabilize; however, the corrosion depth and weight loss rate of specimens under high stress remained significantly higher than those under low stress. This study reveals the synergistic effect of corrosion time and stress on the corrosion evolution law, providing a basis for the service life assessment and anti-corrosion design of engineering steel structures.

Keywords

Q355b steel; Stress corrosion; Corrosion morphology; Neutral salt spray test; Mass loss rate

Q355b 钢在应力作用下的腐蚀行为与演化规律研究

李奕蕊 代咏琪

山东交通学院, 中国 · 山东 济南 250357

摘要

港工钢结构服役环境恶劣, 腐蚀是其服役寿命的关键影响因素。本研究对施加应力的 Q355b 钢试件进行中性盐雾腐蚀试验, 探讨了不同应力水平与腐蚀时间对钢材腐蚀过程的影响。结合宏观形貌分析、三维轮廓仪定量表征及失重法, 结果表明: 相同腐蚀时间下, 应力显著加速蚀坑形成并复杂化腐蚀形貌; 随腐蚀时间延长, 腐蚀速率趋稳, 但高应力下试样的腐蚀深度和失重率仍显著高于低应力组。揭示了腐蚀时间与应力的协同作用规律, 为工程钢结构寿命评估与防腐设计提供依据。

关键词

Q355b 钢; 应力腐蚀; 腐蚀形貌; 中性盐雾试验; 失重率

1 引言

钢材因强度高、成本低、易加工, 广泛用于桥梁、港口等基础设施。在海洋高湿高盐环境及交变载荷下, 钢结构极易腐蚀, 成为影响耐久性与服役性能的关键因素^[1,2]。现有研究表明, 钢材在腐蚀介质作用下不仅发生均匀腐蚀, 更易发生局部腐蚀, 其中以腐蚀坑为典型形式^[3]。腐蚀坑的存在会导致局部应力集中, 严重削弱结构构件的剩余强度与疲劳寿命^[4]。此外, 在实际工程中, 钢结构普遍承受一定的载

荷, 研究发现, 应力可显著影响钢材腐蚀过程, 尤其是局部腐蚀会进一步促进腐蚀坑的萌生与扩展^[5]。

腐蚀时间与应力水平是影响钢材腐蚀形貌和速率的关键因素。现有研究多关注单一指标(如腐蚀速率或坑深), 缺乏多应力水平与不同腐蚀时间的系统对比, 且与实际港工环境有差距。本文在中性盐雾条件下, 对 Q355b 钢施加不同应力, 结合三维形貌扫描与失重测试, 系统揭示了腐蚀形貌特征和失重率随时效与应力的演变规律, 为港工钢结构耐久性评估与防腐设计提供数据支撑。

2 实验方案

2.1 样品准备

试验采用尺寸为 120 mm × 10 mm × 10 mm 的 Q355b 方钢棒。试验前, 依次对试件进行打磨与抛光, 并用无水乙醇彻底清洗, 以消除钢试件自身原有自然腐蚀与磨损对于试验结果的潜在影响。处理完成后的试件如图 1(a) 所示。经过

【基金项目】国家重点研发计划(项目编号: 2022YFB2603000); 国家自然科学基金(项目编号: No.52171267)。

【作者简介】李奕蕊(2001-), 女, 中国山东泰安人, 在读硕士, 从事港工钢结构研究。

上述处理后，记录钢试件初始质量。为研究不同应力对腐蚀特征的影响，设计了持力装置（图 1b），由支撑柱、法兰盘和固定螺母组成。试样两端固定于夹具，通过螺栓调节和压力传感器监控施加恒定压应力。安装试样后完成试验准备。

2.2 测试方法

试验设置 0、50、100MPa 三组压应力水平。加载与非加载试样一同置于中性盐雾箱（ISO 9227-2017：5% NaCl，pH 6.5~7.2， $35 \pm 2^\circ\text{C}$ ）^[6] 中模拟海洋大气环境，腐蚀周期为 15、30、60 天。其中，图 1（c）展示了在盐雾环境中暴露一段时间后，无应力组试件的表面状态，表面锈蚀分布较为均匀。按设定时间取出试样，依据 ISO 8407-2009 用六次甲基四胺溶液浸泡清除腐蚀产物^[7]，至表面无锈蚀（图 1d），冲洗吹干后称重计算失重率。

最后，采用 LEXT OLS5000 三维表面轮廓仪对除锈后的试件表面进行扫描，扫描范围为 $7\text{mm} \times 7\text{mm}$ 。通过对不同腐蚀时间与应力水平下试件的三维扫描结果进行综合对比，可定量评估 Q355b 钢在应力与腐蚀共同作用下蚀坑形貌的演化规律，从而揭示应力对钢材表面腐蚀损伤特征的影响。



图 1 腐蚀前后试件

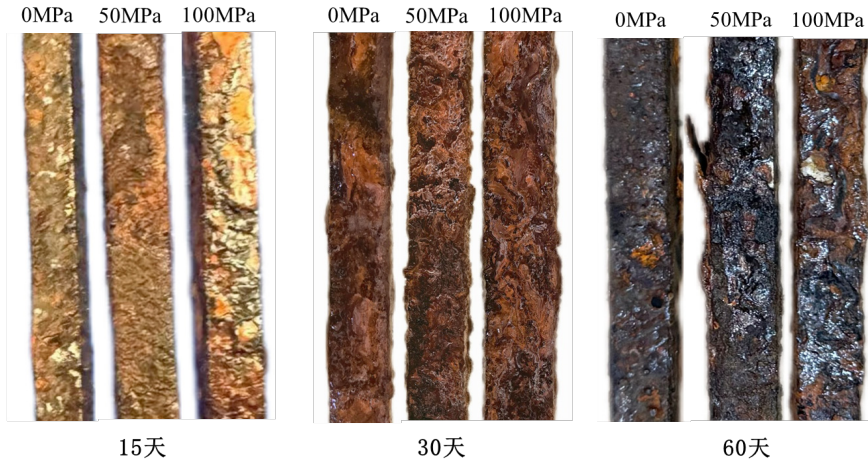


图 2 钢材腐蚀后表面宏观形貌

表 1 钢材表面宏观形貌特征

	0 MPa	50 MPa	100 MPa
15 天	覆盖相对均匀、表面尚光滑	局部粗糙，细小坑点增多	大片黄色锈斑，伴微裂纹
30 天	锈层致密，仍较平整	锈层鼓包较多，坑蚀边缘开裂	锈层小部分剥落，大面积隆起
60 天	黑褐色致密膜，少量微裂	部分鼓包脱落，深坑可见	大片剥落、黑色腐蚀产物厚积

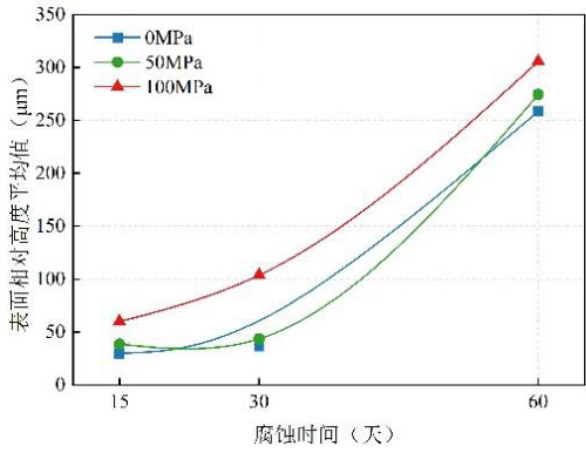
3 结果与讨论

3.1 宏观形貌分析

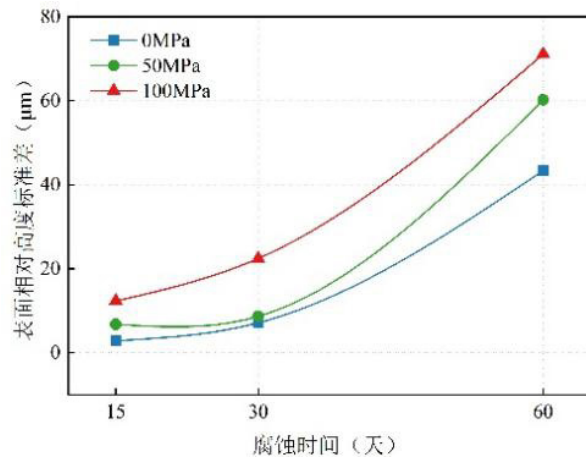
图 2 展示了 Q355b 试件在盐雾环境中暴露 15 天、30 天和 60 天后的宏观腐蚀形貌。为便于直观比较腐蚀时间与外加载应力的综合影响，宏观观察结果归纳于表 1。总体来看，随着暴露时间延长，锈层不断积累增厚，颜色由黄褐渐变为深褐直至近黑，表面形貌亦由均匀细点演化为团簇状隆起，最终出现片状剥落与深坑。对比在相同的腐蚀时间下，可见应力水平越高，坑蚀萌生越早、分布越密且深度越大，锈层结构更疏松，易发生脱落；棱角等应力集中部位最先出现破坏。可以认为，时间主要加剧锈层厚度与表面粗糙度，而应力则显著促进局部坑蚀和锈层失黏，两者协同作用显著增大腐蚀损伤程度。

3.2 蚀坑统计分析

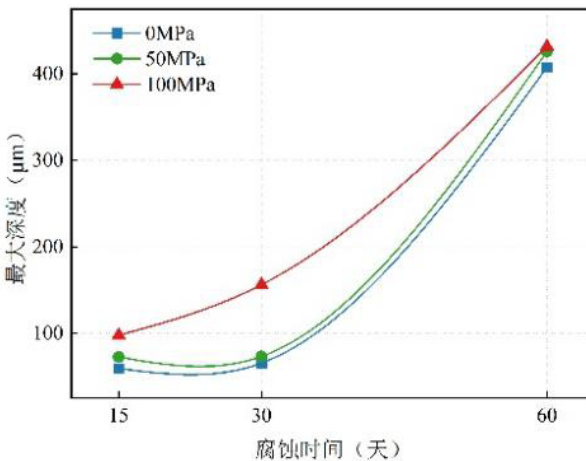
图 3 展示了不同应力水平下 Q355b 钢表面形貌统计特征随腐蚀时间的演变规律。蚀坑平均深度、起伏离散度与最大深度均随时间显著增大，且外加应力放大了这一趋势：腐蚀 15 天时，100MPa 试件的平均与最大坑深约为无应力试件的两倍，标准差亦最高，表明高应力显著加速早期局部腐蚀；30 天时各指标仍随应力升高而增大，但增速已放缓；60 天时平均坑深升至 $250\sim 300\mu\text{m}$ 、最大深度突破 $400\mu\text{m}$ ，三组差距缩小，高应力试件仍保持最高值。这表明外加应力主要加速早期纵向扩展，而中后期腐蚀速率由环境因素主导。应力集中引发的微裂纹为腐蚀介质渗入和深层扩展提供通道，是早期深坑快速形成及表面粗糙度升高的根本原因。



(a) 表面相对高度平均值



(b) 表面相对高度标准差



(c) 最大深度

图 3 不同应力水平下 Q355b 钢表面形貌统计特征随腐蚀时间的变化

3.3 失重分析

图 4 展示了失重率与腐蚀时间的关系。如图可见，各应力水平下失重率均呈非线性上升，且后期增幅远大于前

期；应力越高，曲线斜率越大。腐蚀 15 天时，不同应力状态下的失重率差异不明显；到 30 天，100MPa 曲线略高于 0MPa 与 50MPa，但差距仍较小；当腐蚀延长至 60 天时，100MPa 试件的失重率较无应力组高出约 55%，印证了后期“深坑扩展+锈层剥落”的双重损耗机制。由此可见，时间主导腐蚀量的累积，应力放大其增长速率，且差异随时间显著扩大。这与前文的结论一致：高应力先加速深坑形成，随后进一步促使锈层大面积脱落，最终导致质量损失显著高于无应力状态。

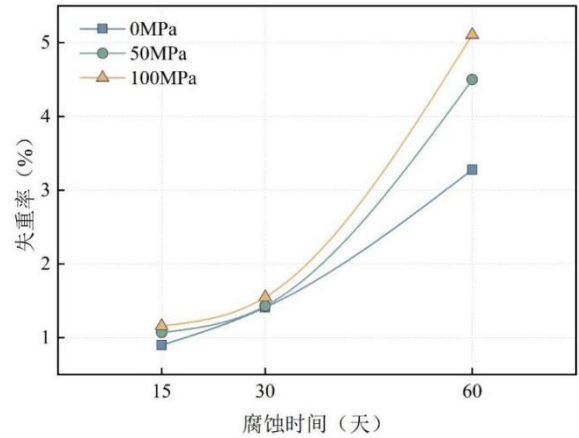


图 4 失重率与腐蚀时间的关系

4 结论

① 钢材腐蚀后锈层经历“成膜—增厚—剥落”三阶段，腐蚀坑深度随腐蚀时间的增长而加深。

② 应力显著加速局部腐蚀。100MPa 试件腐蚀 15 天时坑深是无应力的约 3 倍，60 天时失重率高出 55%。

③ 腐蚀时间决定整体腐蚀程度，应力决定腐蚀速率与不均匀性；两者综合作用使损伤随时间呈加速放大趋势。

参考文献

- [1] 张启富,郝晓东.钢结构腐蚀防护现状和发展[J].中国建筑金属结构,2006,(09):22-26.
- [2] 郑莹莹,邹妍,王佳.海洋环境中锈层下碳钢腐蚀行为的研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2011,23(01):93-98.
- [3] 陈尧.腐蚀环境下基于全寿命设计需求与时变可靠度的钢结构性能退化规律研究[D].东南大学,2021.
- [4] 余秀明.低合金高强度钢浪花飞溅区点蚀行为及机理研究[D].中国科学院研究生院(海洋研究所),2016.
- [5] 张素梅,陈广锐,李爱东,等.Q420qD 钢材应力腐蚀特征试验研究[J].建筑科学与工程学报,2022,39(01):55-64.
- [6] 杨晨晴,郭琪,陈庆伟,等.长期盐雾腐蚀下高强螺栓受拉性能试验[J].科学技术与工程,2023,23(10):4293-4300.
- [7] 宋学鑫,黄松鹏,汪川,等.碳钢在红沿河海洋工业大气环境中的初期腐蚀行为[J].金属学报,2020,56(10):1355-1365.