

DOI: 10.15886/j.cnki.hdxzbk.2024032001

CSTR: 32403.14.hndk.2024032001

热带海岛工程



引用格式: 储宵宵, 王珍珍, 王伟, 等. 盐雾下 Q235 钢腐蚀特性及基于 VIC-3D 的拉伸性能研究 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2025, 43(1): 33-40.

Citation: CHU Xiaoxiao, WANG Zhenzhen, WANG Wei, et al. Corrosion characteristics of Q235 steel under salt spray and tensile performance based on VIC-3D[J]. Natural Science of Hainan University, 2025, 43(1): 33-40.

盐雾下 Q235 钢腐蚀特性及基于 VIC-3D 的 拉伸性能研究

储宵宵, 王珍珍, 王伟, 周智*

(海南大学 土木建筑工程学院, 海南海口 570228)

摘要: 通过中性盐雾箱对 Q235 钢连续喷雾 1、3、7、21 和 42 d, 对比分析了 Q235 钢腐蚀后的宏/微观形貌变化、质量损失、表面应变场变化以及各力学性能指标(弹性模量、屈服强度、抗拉强度, 断后应变)随失重率的退化规律, 研究了不同腐蚀时间对 Q235 钢的影响。结果表明, 盐雾作用加速了钢材的锈层沟壑形貌形成及脱落进程, 使微观形貌由稀疏点蚀状向麻点状, 再向蜂窝状发展; 平均腐蚀速率随着盐雾时间先减小后增大; 各力学性能指标与失重率呈线性关系; 随着腐蚀时间延长, 高应变区域变得更加分散, 表面应变场的不均匀性加剧, 在弹性阶段和强化阶段尤为明显; 盐雾作用会降低断裂阶段应变差值, 使材料变脆, 宏观表现为断裂形态由斜断裂向阶梯断裂转变。

关键词: Q235 钢; 表面形貌; VIC-3D 技术; 拉伸性能

中图分类号: S932.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-1729(2025)01-0033-08

Corrosion characteristics of Q235 steel under salt spray and tensile performance based on VIC-3D

CHU Xiaoxiao, WANG Zhenzhen, WANG Wei, ZHOU Zhi*

(School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: In the report, the continuous spraying of Q235 steel for 1, 3, 7, 21, and 42 d with a neutral salt spray tank were performed to compare and analyze the macro/micro morphology changes, mass loss, surface strain field changes, and the degradation law of various mechanical properties (elastic modulus, yield strength, tensile strength, and strain after fracture) with the weight loss rate of Q235 steel after corrosion. The effects of the corrosion time on Q235 steel were also studied. The results showed that salt spray accelerated the formation and shedding process of the rust layer, the microstructure developed from sparse pitting to pitting, and then to honeycomb. The average corrosion rate decreased firstly, and then increased with the salt spray time. The mechanical properties had a linear relationship with the weight loss rate. With the extension of corrosion time, the high strain area became more dispersed, the surface strain field became more uneven, especially in the elastic stage and the strengthening stage. Salt spray reduced the strain difference at the fracture

收稿日期: 2023-03-20

基金项目: 海南省院士创新平台项目(YSPTZX202006)

作者简介: 储宵宵(1999—), 男, 安徽安庆人, 海南大学材料与化工专业 2021 级硕士研究生, E-mail: 2306392096@qq.com

通信作者: 周智(1973—), 男, 湖南永州人, 博士, 教授, 研究方向: 纤维增强树脂材料 FRP 及其海岛工程应用; 高性能传感器网络与结构健康监测, E-mail: zhizhou@hainanu.edu.cn

stage, and made the material brittle, and the macro fracture morphology changed from inclined fracture to step fracture.

Keywords: Q235 steel; microscopic morphology; VIC-3D technology; tensile performance

0 引言

Q235 钢是一种碳素结构钢,具有良好的可焊性、塑性和韧性、机械性能以及低成本等优点,在建筑、制造、机械等领域得到了广泛的应用,是中国最常用的结构钢之一^[1]。但 Q235 钢容易腐蚀是其致命的缺点,腐蚀对结构本身产生了不可弥补的损伤,也对中国造成巨大的经济损失,每年因腐蚀造成的损失高达 5 000 亿元,约占国内生产总值的 5%^[2]。在工程领域,获得几十年的腐蚀数据并不现实,因此研究金属材料或结构的腐蚀数据和腐蚀特性时,主要依赖于加速试验方法^[3-5]。考虑到各种试验方法、试验条件和技术,为了获取不同锈蚀程度的试件,本次研究选择中性盐雾喷雾的方法加速 Q235 钢腐蚀。基于此,作者在中性盐雾腐蚀环境中对 Q235 钢板进行加速腐蚀试验,通过宏观和微观表面形貌,分析了不同腐蚀阶段的腐蚀特征,采用单调拉伸试验研究了锈蚀钢板力学性能随质量损失率增大而退化的规律。

拉伸试验使用的 VIC-3D 技术是一种非接触全应变场测量方法,即数字图像相关法(DIC),此方法具有非接触、自动化、全场化的优点,近年来该技术已在多个领域得到应用^[6]。2009 年,美国 CSI 公司成功研发了 VIC-3D 测量系统并将其应用于航空航天领域^[7];2014 年,吴庆等^[8]利用 VIC-3D 技术准确测量单轴受压下高强混凝土破坏形式,分析了 Y 向应变与 X 向应变演化破坏机理;2017 年,陈亚军等^[9]使用 VIC-3D 技术测量了航空用 GH2036 合金静态拉伸二维应变及应力场,研究了其拉伸性能;2021 年,王宁等^[10]利用 VIC-3D 技术研究了 IN718 合金块的静态力学性能。目前, VIC-3D 技术在国内外主要应用在高性能合金材料和混凝土等方面。

本文在盐雾腐蚀不同时间后 Q235 钢拉伸过程中,考虑到传统引伸计测量标距会受到材料表面条件和安装位置的限制,且只能测量试样两点之间应变。相比之下, VIC-3D 技术能够捕捉到试件表面每一点的微小形变,从而采集到不同拉伸阶段的分布式应变场变化数据。本文引用了 VIC-3D 技术,拓展了该技术在金属腐蚀力学性能评价方面的应用,提供了更全面、更直观的不同盐雾时间的应变场信息,可为以后相关腐蚀机理研究、材料性能评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料 Q235 钢作为实验材料,其主要化学成分如下: 0.182% 碳(C)、0.045% 硅(Si)、0.15% 锰(Mn)、0.017% 磷(P)、0.016% 硫(S)。依据规范《金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010》,将 Q235 碳钢进行设计加工,如图 1 所示。拉伸试样原始标距为 L_0 为 50 mm、过渡段曲率半径 R 为 30 mm、截面平均厚度为 3.75 mm,宽度为 40 mm。

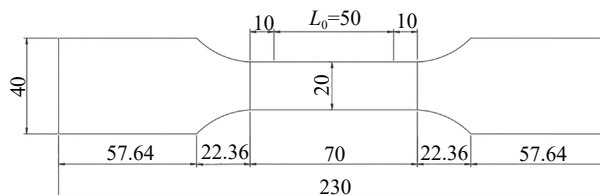


图 1 拉伸试样的形状和尺寸(单位:mm)

1.2 试验方法

1.2.1 中性盐雾试验 根据《铝及铝合金阳极氧化膜检测方法第 3 部分: 铜加速乙酸盐雾试验(CASS 试验): GB/T 12967.3—2008》进行盐雾试验,连续喷雾 1、3、7、21 和 42 d。其中喷雾溶液为 5% 的 NaCl 溶液,试验箱温度为 35 ℃,试样摆放倾角为 30°。为保证数据准确性,喷雾到达每一个时间节点时,取 3 个平行试样,放置于干燥箱中,在 60 ℃ 下干燥 3 h 去除挂片表面残留水分。

利用化学法进行除锈:通过屹嘉临高浓缩钢铁除锈剂进行除锈工作。相对于成本较低的工业盐酸、工业硫酸除锈剂,该除锈剂中螯合剂、表面活性剂和缓释剂在一定程度上减少了对金属基体损伤,其主要技术指标见表 1。

表 1 除锈剂技术指标

性状	pH	用水配比	试用温度/℃	浸渍时间/min
无色透明至淡黄色液体	2.0	1:1.5	常温 ~ 50	5 ~ 20

除锈后用去离子水洗涤, 试件表面喷洒无水乙醇二次清洗, 置于电热鼓风干燥箱中干燥 3 h, 之后通过高精度电子天平(精度为 0.001 g)测得除锈后每个试件的质量。本文采用失重率 η 、腐蚀深度 D 和腐蚀速率 V 作为主要的质量损失分析指标, 其计算公式如下所示:

$$\eta = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$D = \frac{10\,000 \times (m_0 - m_t)}{\rho \times A} \quad (2)$$

$$V = \frac{D}{T} \quad (3)$$

式中: η 表示失重率, %; D 表示腐蚀深度, μm ; V 表示腐蚀速率, $\mu\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$; ρ 为 Q235 钢的密度, 为 $7.86 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; A 为试样的表面积, cm^2 ; m_0 和 m_t 分别为除锈前后 Q235 钢的质量, g; T 为腐蚀时间, d。

1.2.2 表面腐蚀形貌分析 为分析 Q235 钢经过不同腐蚀时间后的宏观形貌和去腐蚀产物后微观形貌, 分别采用手机摄像头和 XJP-3A 金相显微镜拍照。

1.2.3 基于 VIC-3D 下的拉伸试验 本次 Q235 钢材拉伸试验设备主要是 ETM1050 型微机控制电子万能试验机, 如图 2 所示。试件标距之间的变形利用电子引伸计(型号 EX-05025)进行测量, 量程为 50 mm, 变形测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。文献 [11] 表明, 除锈处理或未除锈处理对锈蚀 Q235 钢拉伸试件断裂形态、荷载位移曲线、力学性能几乎没有影响, 因此本文可对除锈处理后钢材进行单轴拉伸实验。

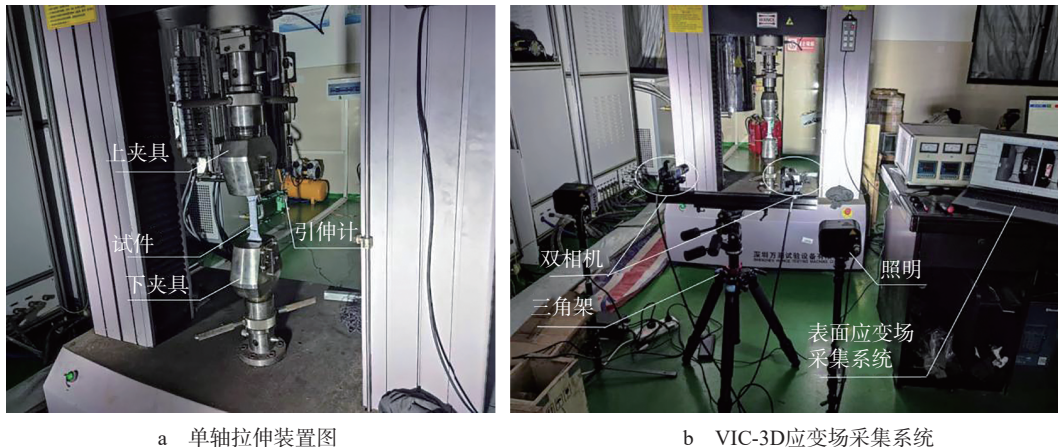


图 2 基于 VIC-3D 下的拉伸试验

拉伸试验前需进行 VIC-3D 标定。根据视场区的大小, 本试验选择 7 mm 的标定板。将带有黑色底板和白色斑点的标定板放置在拉伸性试样的正前方, 再对标定板进行多方位的移动, 如图 3 所示, 其中(a)至(i)为标定过程的一部分, 对标定图片进行识别和筛选, 以准确地求出摄像头的内、外参数和畸变参数并进行校正, 提高应变场测量结果的准确性和可靠性。在拉伸过程中, 表面应变场采集系统会按照 2 秒的时间间隔实时采集全动态过程图像, 直至实验结束。最后, 对采集的图像进行处理分析, 以获取整个拉伸过程的表面应变场变化。

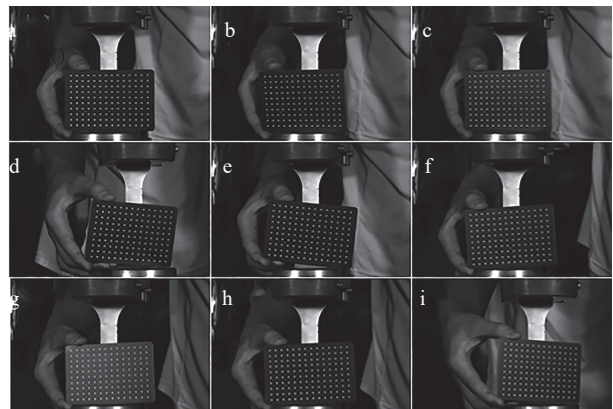


图 3 拉伸试验的标定

2 结果与讨论

2.1 表面形貌分析

2.1.1 宏观形貌 图4是Q235钢不同盐雾腐蚀时间后的宏观表面形貌。通过观察腐蚀过程中Q235钢在不同腐蚀时间下表面形貌的变化,可以将腐蚀过程分为初期、中期和后期3个阶段。

初期:腐蚀1 d,整个表面均匀覆盖了一层红褐色锈层,以红褐色锈层为主,含有轻微黑色锈迹。由 Fe_3O_4 的物理特性,可推断腐蚀产物中黑色部分为 Fe_3O_4 ;中期:腐蚀3 d,试件底部由于盐水沉积,有向黑色锈层发展的趋势,试件中间腐蚀坑连成一片,开始出现沟壑形貌。锈蚀7 d,表面主要为红褐色锈层,同时有细条黑黄锈层分布,沟壑变深。后期:腐蚀21 d,锈层基本为黑红色,腐蚀比较严重,形成了比较明显的凹凸不平腐蚀面,未见明显锈层脱落现象,但表面伴有明显鼓胀,可能是由于前期锈层脱落造成钢材内部基体进一步腐蚀所致,在外力敲击下可与基体大面积分离。腐蚀42 d,表面腐蚀十分严重,锈层呈黑褐色,厚而疏松,与基体结合力相对较弱,轻敲易脱落。

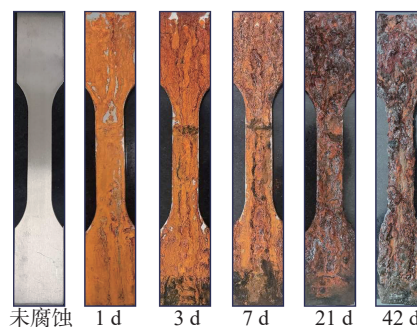


图4 Q235钢经不同的盐雾腐蚀时间后表面宏观形貌

沟壑形貌的形成主要有两方面原因:一是NaCl盐雾加速了钢材腐蚀,锈层疏松化的原因可能是由于 $\gamma\text{-FeOOH}$ 的产生^[12]。二是与试件在盐雾试验箱中的放置位置有关。将试件置于 30° 倾角,受重力作用沉降后,盐雾沉降会沿斜面流动,在中间区域积聚,将表面疏松的腐蚀性产物冲刷掉,然后形成一个独特的沟壑形状的表面^[13-14]。此外,由图4观察到沟壑形貌随腐蚀时间的延长而由浅宽向深窄依次递进。

2.1.2 微观形貌 将Q235钢盐雾腐蚀不同时间,除锈后拍摄表面的金相微观照片,如图5所示。初期:腐蚀1 d,钢材表面开始出现稀疏的点蚀坑;中期:腐蚀3 d,表面点蚀坑呈麻点状,密布着不同大小的点蚀坑;腐蚀7 d,表面抛光划痕消失,基层表层已全部被腐蚀破坏,存在大量点蚀坑,且点蚀坑逐渐增大,由麻点状向蜂窝状发展。后期:腐蚀21 d和42 d,点蚀坑深度进一步增加,并且在原有点蚀坑不断扩大加深的同时,其内部产生新点蚀坑,并逐渐向基体内部发展。

Q235钢属于非活性金属,点蚀范围与周边环境不存在显著的电位差,因此不具备形成点蚀阻塞模型的基本条件。从图4观察,整体腐蚀速度相对较快,无显著局部腐蚀现象。在盐雾环境下,Q235钢被判定为均匀腐蚀,导致厚度减少。

2.2 腐蚀失重分析 图6为中性盐雾Q235钢的腐蚀深度和平均腐蚀速率关于腐蚀时间的曲线,其中1、3、7、21、42 d的腐蚀速率标准偏差分别为0.076 3、0.185 3、0.077、0.202 9和0.290 2。由图6发现腐蚀深度不断增大,但是平均腐蚀速率呈先减小后增大的趋势。腐蚀1 d到3 d,平均腐蚀速率从 $4.60 \mu\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ 降到 $4.24 \mu\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。研究表明,在氯离子环境下,腐蚀初期,钢材表面会生成 FeOCl 和 Fe_3O_4 等腐蚀产物^[15-16]。这一定程度上降低了氯离子的渗透作用,增强了对基体的保护作用;由图4发现表面覆盖的锈层对空气中盐雾也起到一定的隔离作用,减轻了盐雾的腐蚀效果。腐蚀中后期:7 d到21 d,再到42 d,随着时间的延长,平均腐蚀速率逐步增加,由 $4.36 \mu\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ 上升至 $4.68 \mu\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$,再上升至 $5.82 \mu\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。由图4可见Q235钢腐蚀42 d,锈层表面大量龟裂,加速盐雾渗入;其次锈层松散,大量空隙加速氯离子的渗透,锈层对钢基体的保护作用大幅度减弱,加快了盐雾的腐蚀效果。综上所述,Q235平均腐蚀速率,呈现先减小后增大的趋势。

2.3 力学性能分析 图7所示为Q235钢在未腐蚀及中性盐雾环境下腐蚀7、21和42 d后的应力-应变关系曲线。由图7可知,随着腐蚀时间的延长,弹性阶段变化不明显,弹性阶段以后的曲线出现较为清晰的分层现象,即表示随着腐蚀时间的延长,试件的应力总体随腐蚀时间增大呈下降趋势,表现为屈服强度、抗拉强度和断后应变随着腐蚀时间的衰减。由图7中A区域发现,随着盐雾时间的延长,屈服平台变得更加平缓,且平台长度逐渐缩减。在腐蚀42 d后,此时屈服平台越来越不明显,已经接近消失。屈服

平台变短或消失的原因可能是点蚀坑引起的应力集中造成拉伸试件截面应力发展不均匀, 进而导致屈服平台的变化。由图 7 中 B 区域发现, 颈缩阶段曲率突然变小说明盐雾作用使钢材发生脆断。

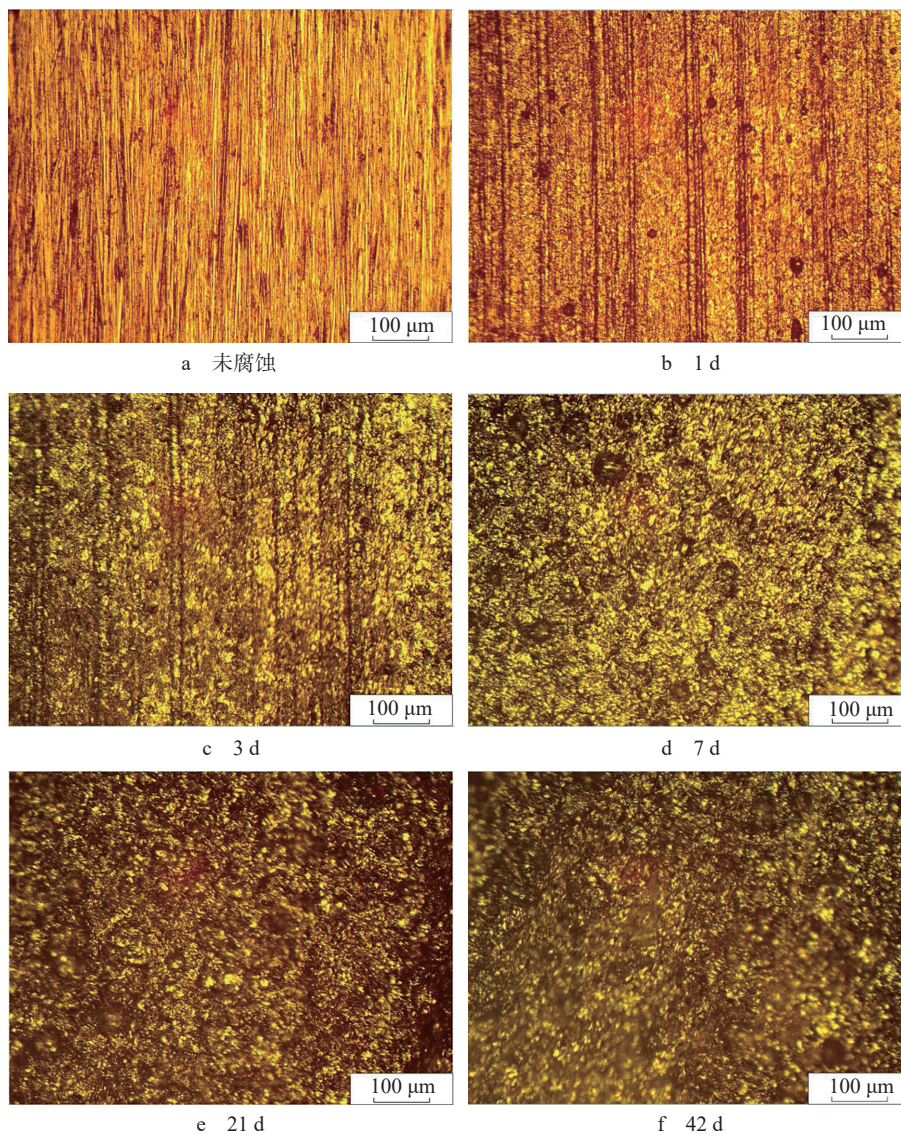


图 5 不同盐雾腐蚀时间下 Q235 钢除锈后的表面微观形貌

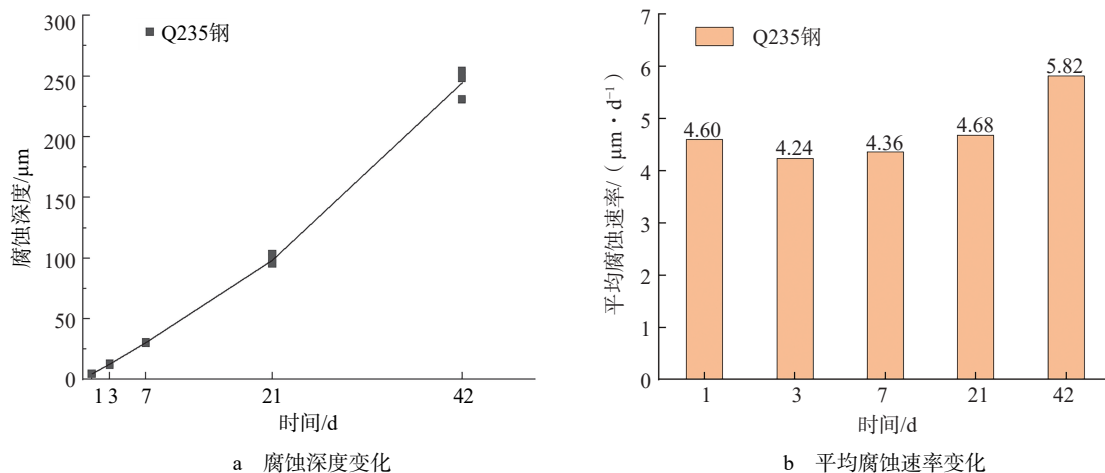


图 6 中性盐雾腐蚀不同时间 Q235 的腐蚀深度和平均腐蚀速率

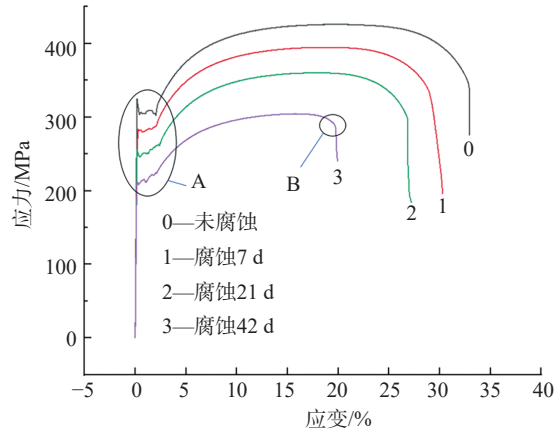


图7 Q235钢应力-应变曲线

建立力学指标与失重率的关系,如图8所示。综合分析发现,Q235钢各力学指标均与失重率呈线性关系,随失重率升高,屈服强度、抗拉强度、断后应变、弹性模量均明显降低。

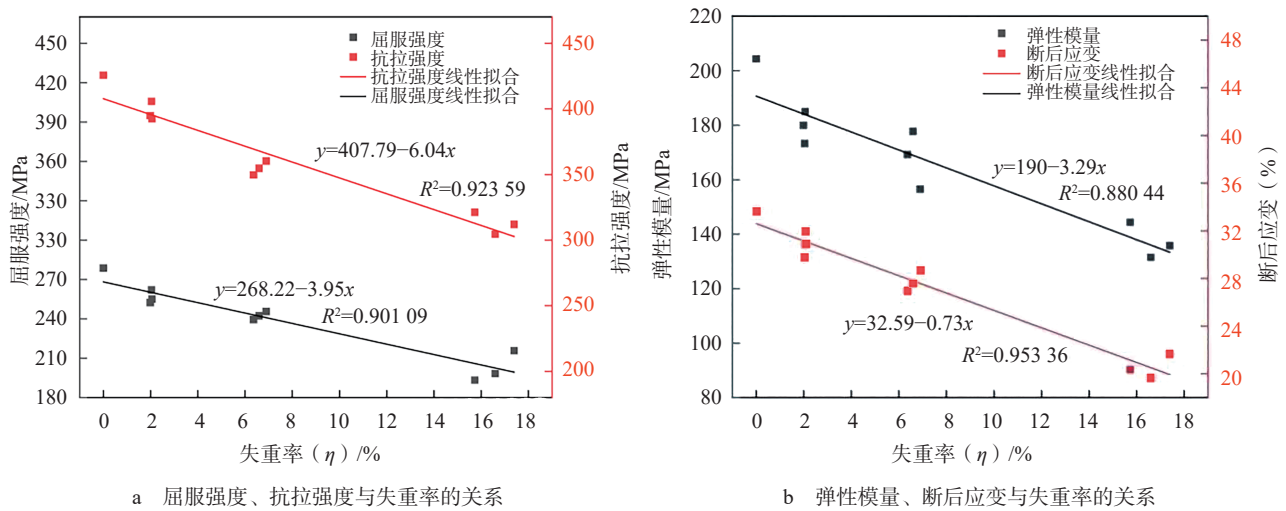


图8 力学性能指标与失重率的关系

2.4 表面应变场分析 为了分析静态拉伸过程中表面应变场的分布情况,基于VIC-3D技术得到试件在腐蚀不同时间的应变云图,结果如图9a~图9d所示,其中 e_{yy} 刻度值表示拉伸竖向应变,应变由小到大的变化对应颜色由紫到红的变化。图10为应变云图所对应的拉伸破坏形态的试件。

整体分析发现,未发生腐蚀试件和试验周期为7d的试件,应变分布相对均匀,说明材料尚未经历显著的腐蚀损伤,保持了良好的力学性能和一致的变形能力。随着腐蚀时间增加到21d,应变集中区域开始变得分散,说明在盐雾腐蚀作用下,金属表面上逐渐变得凹凸不平,在点蚀坑洞密布的地方形成应力集中区,造成局部应变增加。腐蚀42d时,应变区域变得更加分散,表面应变场的不均匀性极速加剧,在弹性阶段和强化阶段尤为明显。

对于未腐蚀试件,在颈缩阶段之前,塑性变形不明显,而屈服阶段的应变差值最大,为0.022,这说明在弹性、屈服和强化阶段,每个区域的变形都比较均匀,试件没有发生腐蚀损伤。在颈缩阶段,可以清晰地观察到应变场中红色区域出现,应变高度集中导致此处试件的横截面积减小,出现较大的塑性变形。在试件快要发生断裂时,较大的变形破坏该区域散斑,出现一些无法采集计算的区域,此时的应变差值达到峰值(为1.385)。

腐蚀7d试件的应变云图,与未腐蚀的试件类似,但是屈服阶段应变差值为0.0213,略小于未腐蚀试件,断裂阶段应变差值为1.145。腐蚀21d和42d试件的断裂阶段最终应变差值分别为0.965、0.60;腐蚀42d的紧缩阶段就已经出现了散斑破坏现象,解释了图7中B区域颈缩阶段曲率突然变小。综上分

析, 屈服阶段和断裂阶段最终应变差值: 未腐蚀的试件>腐蚀 7 d 试件>腐蚀 21 d 试件>腐蚀 42 d 试件, 据此可知综上, 盐雾作用会降低断裂阶段最终应变差值, 降低了钢材的延性, 使材料变脆, 宏观表现为断裂形态由斜断裂向阶梯断裂转变。

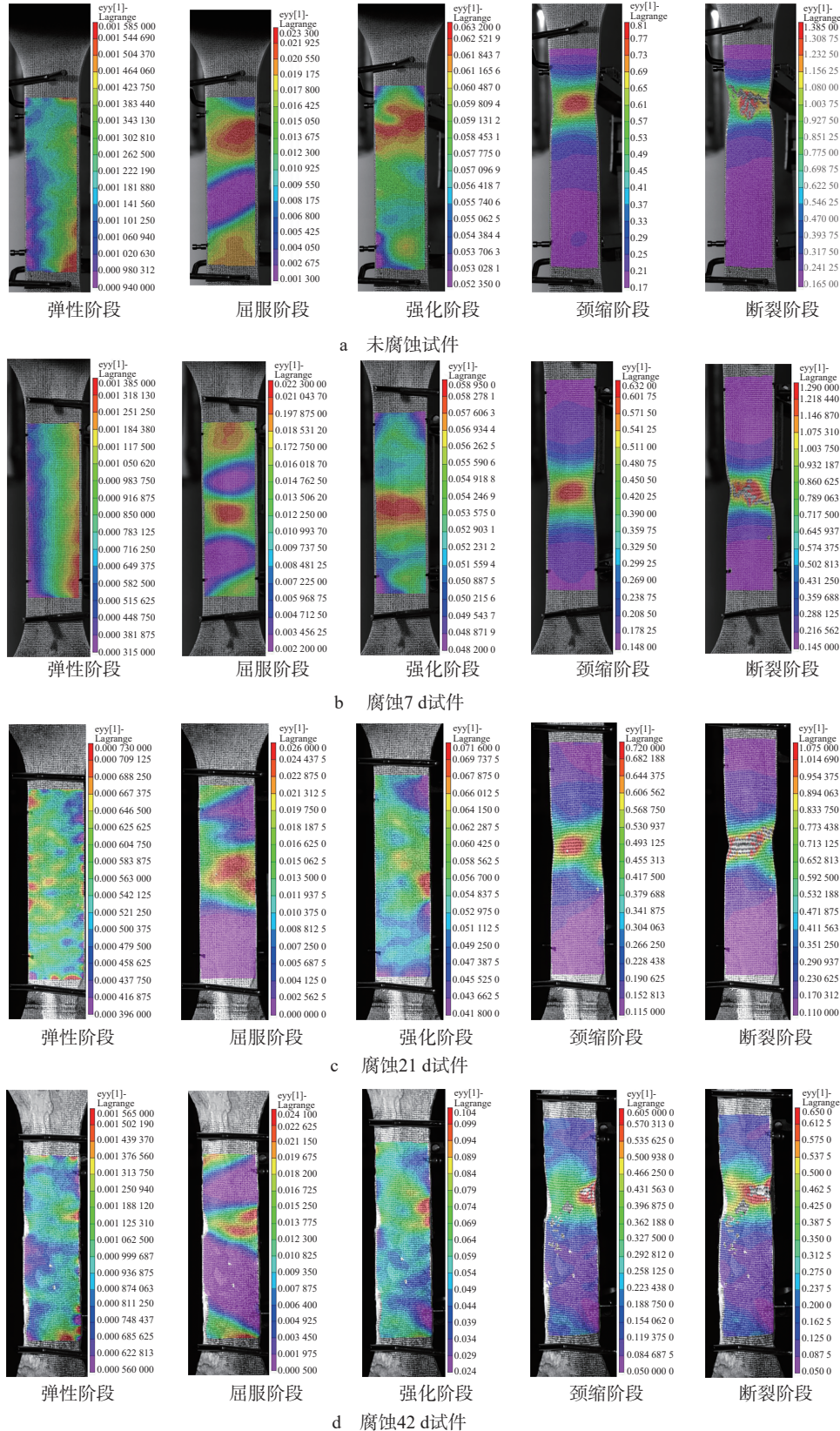


图 9 试件腐蚀不同时间的拉伸应变云图



图 10 试件拉伸破坏形态

3 结 论

(1)在中性盐雾环境下, Q235 锈层颜色变化趋势为“红褐色→黑红色→灰褐色”, 随着腐蚀时间的延长, 沟壑形貌随腐蚀时间的延长而由浅宽向深窄递进。表面微观形貌: 稀疏点蚀状→麻点状→蜂窝状发展。

(2)随着盐雾时间的增加, Q235 钢腐蚀深度不断增大, 但是平均腐蚀速率呈先减小后增大的趋势。

(3)随着失重率增加, Q235 钢各力学指标(弹性模量、屈服强度、抗拉强度、断后应变)呈线性降低。屈服平台随着腐蚀时间的延长而逐渐变短, 甚至接近消失。

(4)随着拉伸试验进行, 应变集中区域会逐渐发展为试样最终断裂的位置; 随着腐蚀时间延迟, 应变集中区域会变得更加分散, 表面应变场的不均匀性加剧; 盐雾作用会降低屈服阶段和断裂阶段应变差值, 使材料变脆, 宏观表现为断裂形态由斜断裂向阶梯断裂转变。

参考文献:

- [1] 吴承建, 陈国良, 强文江, 等. 金属材料学 [M]. 第 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [2] 侯保荣. 中国腐蚀成本 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [3] WANG J T, JIANG B C, CAO J D. Corrosion mechanism of Q235A under 3.5% NaCl salt spray[J]. Materials Transactions, 2020, 61(12): 2342-2347.
- [4] 李子杰, 黄昊, 欧阳昕, 等. 海上设备材料腐蚀加速试验研究 [J]. 船舶工程, 2020, 42(S1): 403-404, 467.
- [5] 林臻, 李国璋, 白鸿柏, 等. 金属材料海洋环境腐蚀试验方法研究进展 [J]. 新技术新工艺, 2013(8): 68-74.
- [6] 陈亚军, 黄彦, 薛程丹, 等. 航空 2024 铝合金 VIC-3D 静载分析和疲劳试验 [J]. 有色金属工程, 2016, 6(3): 35-39, 67.
- [7] 赵一帆, 王付胜, 裴惠, 等. 基于数字图像技术的 LY12 铝合金形变分析 [J]. 理化检验(物理分册), 2018, 54(1): 1-5, 11.
- [8] 吴庆, 倪源, 孙林柱, 等. 基于 VIC-3D 技术的高强混凝土单轴受压试验研究 [J]. 混凝土, 2014(11): 19-23.
- [9] 陈亚军, 季春明, 吴幸星, 等. 航空用 GH2036 合金的 VIC-3D 静载分析和冲击性能优化 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(9): 134-138.
- [10] 王宁. 激光沉积制造 Inconel718 合金力学性能及颗粒强化机制研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2021.
- [11] 盛杰. 荷载与地下环境耦合作用下 H 型钢梁锈蚀特征及力学性能研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [12] 王建涛, 郭云龙, 金涛. 3.5%NaCl 盐雾条件下 Q235A-Z35 钢的腐蚀行为研究 [J]. 材料保护, 2020, 53(4): 89-92.
- [13] 杨振清. 盐雾环境中涂层钢筋腐蚀性行为研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [14] 龚田太郎. 典型金属材料海洋环境大气暴露试验与实海加速腐蚀试验相关性研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.
- [15] WANG J, WANG Z Y, KE W. Characterisation of rust formed on carbon steel after exposure to open atmosphere in Qinghai salt lake region[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2012, 47(2): 125-130.
- [16] MORCILLO M, CHICO B, ALCÁNTARA J, et al. Atmospheric corrosion of mild steel in chloride-rich environments. Questions to be answered[J]. Materials and Corrosion, 2015, 66(9): 882-892.

(责任编辑: 陈 俊)