

DOI:10.11784/tdxbz202504034

# 盐雾腐蚀环境下 TSZ410 新型铁素体 不锈钢力学性能演化及本构模型

郭琪<sup>1</sup>, 刘杰<sup>1</sup>, 邢颖<sup>1</sup>, 李海旺<sup>1</sup>, 刘继武<sup>2</sup>, 赵敏<sup>3</sup>

(1. 太原理工大学土木工程学院, 太原 030024; 2. 国网山西省电力公司经济技术研究院, 太原 030021;  
3. 山西五建集团有限公司, 太原 030013)

**摘要:** 为定量模拟 TSZ410 新型铁素体不锈钢在海洋大气环境下的服役性能, 开展了 20 d、40 d、60 d、80 d、100 d 和 120 d 的中性盐雾加速腐蚀试验、腐蚀后的宏观测试及力学性能试验, 并选择 Q420 钢作为对比组, 阐明了腐蚀形貌、锈层成分和质量损失率的演化规律, 确立了力学性能与加速腐蚀天数的定量关系, 分别提出了两种钢材在腐蚀环境下的本构模型. 研究表明: 随着腐蚀时间的增长, TSZ410 钢也会出现轻微锈蚀, 锈层成分由初期疏松的 MnO(OH)- $\alpha$ -FeOOH 锈层逐渐转化为致密的 MnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 复合锈层, 因此抗侵蚀性能增强, 120 d 时质量损失率仅为 1.76%; Q420 钢锈层全周期以疏松多孔的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 为主, 伴随  $\alpha$ -FeOOH、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 向 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 转化, 腐蚀速率加快, 120 d 时质量损失率高达 13.51%. 此外, 建立了强度参数(屈服强度、极限强度和断裂强度)、应变参数(硬化应变、极限应变和断裂应变)、弹性模量以及断后延伸率随腐蚀时间的线性劣化方程. 120 d 时, Q420 钢屈服强度、极限强度降幅高达 12.53%, 而 TSZ410 钢的对应值降幅仅为 4.65%. 在此基础上, 建立了基于腐蚀时间演化的双硬化(D-H)、二次流塑性(S-FP)和 Ramberg-Osgood(R-O)本构模型, 推荐 Q420 钢和 TSZ410 钢分别采用 D-H 模型和 R-O 模型建立精细化本构(误差小于 2%), TSZ410 钢的 R-O 模型在工程中也可不计腐蚀影响(控制曲线形状的参数取常数 25.64), 亦能取得可以接受的结果(误差小于 6%). 本文结果为工程中评估 TSZ410 铁素体不锈钢腐蚀后的力学性能提供了理论依据.

**关键词:** 铁素体不锈钢; 腐蚀; 质量损失; 力学性能劣化; 本构模型

中图分类号: TU502.6

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)12-1315-14

## Mechanical Property Evolution and Constitutive Model of Novel Ferritic Stainless Steel TSZ410 Under Salt Spray Environment

Guo Qi<sup>1</sup>, Liu Jie<sup>1</sup>, Xing Ying<sup>1</sup>, Li Haiwang<sup>1</sup>, Liu Jiwu<sup>2</sup>, Zhao Min<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Economic and Technological Research Institute, State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030021, China;

3. Shanxi Fifth Construction Group Co., Ltd., Taiyuan 030013, China)

**Abstract:** To quantitatively simulate the service performance of novel ferritic stainless steel TSZ410 in marine atmospheric environments, neutral salt spray accelerated corrosion tests were conducted for 20 d, 40 d, 60 d, 80 d, 100 d and 120 d, with Q420 steel selected as the control group. In addition, post-corrosion macroscopic/microscopic characterization and mechanical property tests were carried out. The evolution laws of corrosion morphology, rust layer composition and mass loss rate were analyzed, the quantitative relationships between mechanical properties and accelerated corrosion durations were established, and the constitutive models for the two types of steel in corrosion environments were proposed, respectively. Results indicate that TSZ410 steel also exhibited minor rusting over

收稿日期: 2025-04-28; 修回日期: 2025-06-21.

作者简介: 郭琪(1989—), 男, 博士, 副教授, guoqi@tyut.edu.cn.

通信作者: 邢颖, xingying@tyut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52208192, 52478194); 山西省基础研究计划资助项目(202203021221062).

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52208192, No. 52478194), the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China(No. 202203021221062).

the corrosion time, and its rust layer gradually transitioned from an initial phase of loose  $\text{MnO}(\text{OH})-\alpha\text{-FeOOH}$  into a dense  $\text{MnCr}_2\text{O}_4\text{-Fe}_3\text{O}_4$  composite rust layer, thus enhancing its corrosion resistance. After 120 d, its mass loss rate was only 1.76%. In comparison, the rust layer of Q420 steel consisted mainly of loose and porous  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  throughout the entire cycle, which was accompanied by the transformation of  $\alpha\text{-FeOOH}$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  into  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . This led to an accelerated corrosion rate, with a mass loss rate of up to 13.51% after 120 d. Moreover, linear degradation equations were established for strength parameters (e.g., yield strength, ultimate strength and fracture strength), strain parameters (e.g., hardening strain, ultimate strain and fracture strain), elastic modulus and the elongation rate after break over the corrosion time. It was found that Q420 steel suffered significant reduction (12.53%) in both the yield strength and ultimate strength, whereas TSZ410 steel only showed minimal degradation (4.65%). On this basis, the double hardening (D-H), secondary flow plastic (S-FP) and Ramberg-Osgood (R-O) constitutive models based on the evolution of corrosion time were built. The D-H constitutive model is recommended for Q420 steel, while the R-O constitutive model is recommended for TSZ410 steel, both achieving high precision (i.e., an error of less than 2%). The R-O constitutive model for TSZ410 steel can also neglect the effects of corrosion in engineering applications, with the curve shape control parameter set as a constant of 25.64. This model is also capable of yielding acceptable results, with an error of less than 6%. The results in this paper provide a theoretical basis for assessing the mechanical properties of ferritic stainless steel TSZ410 after corrosion in engineering applications.

**Keywords:** ferritic stainless steel; corrosion; mass loss; mechanical property degradation; constitutive model

不锈钢因其耐腐蚀性、高强度及经济性,广泛应用于建筑、桥梁及海洋工程等领域<sup>[1-3]</sup>。然而,传统奥氏体不锈钢强度较低,双相不锈钢成本高昂,在土木工程中的推广和应用均受到限制。山西太钢不锈钢股份有限公司通过合金成分优化,研发出新型 TSZ410 铁素体不锈钢,其成本较传统不锈钢降低约 50%,力学性能也可与 Q420 钢匹配。但是,中国规范未包含此类不锈钢,国际规范也仅停留在传统低强度的铁素体不锈钢,并未涉及新型铁素体不锈钢。因此,亟待研究新型不锈钢在长期腐蚀环境中的服役特性和力学性能。

在不锈钢的腐蚀及力学性能方面,Dastgerdi 等<sup>[4]</sup>和 Zhu 等<sup>[5]</sup>通过试验发现了奥氏体 304、316 在腐蚀环境下明显的点蚀现象,指出温度、pH 值和氯化物质量分数为影响蚀坑形貌的主要因素。胡丽华等<sup>[6]</sup>通过细菌培养试验和天然海水环境浸泡腐蚀试验,研究了 2507 双相体不锈钢在南海深水环境中的点蚀和缝隙腐蚀行为。范镒等<sup>[7]</sup>研究了奥氏体 304、316、321 在空气和海水环境下的疲劳裂纹扩展速率。杨斌等<sup>[8]</sup>对 2205 双相体不锈钢开展了同类试验,发现疲劳失效往往源于蚀坑处。Yuan 等<sup>[9]</sup>通过奥氏体 304 不锈钢板和 Q235 碳钢板螺栓连接节点的电化学腐蚀试验,阐明了不同腐蚀程度下该连接件的承载力退化规律。班慧勇等<sup>[10]</sup>研究了不锈钢-碳钢复合钢材及其焊接接头在周浸试验下的腐蚀特性。现有研究多聚焦于奥氏体不锈钢、双相不锈钢及复合不锈钢,关于铁素体不锈钢的研究较少,新型铁素体不锈钢的腐蚀行

为、力学性能退化规律尚未得到系统研究,腐蚀环境下的本构模型仍不完善。

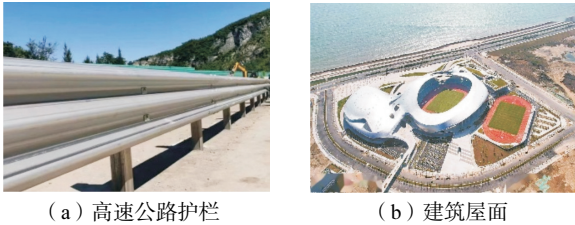
本文对新型 TSZ410 铁素体钢开展了 0~120 d 的中性盐雾腐蚀试验,并选取 Q420 钢作为对比组,研究了两种钢材腐蚀宏观形貌、锈层 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 和质量损失率的演化规律。对腐蚀后的试件进行了拉伸试验,研究了腐蚀时间对断裂模式的影响,分析了力学指标、应变指标、弹性模量和断后伸长率随腐蚀时间的劣化规律。基于 Ramberg-Osgood (R-O) 模型、双硬化 (double hardening, D-H) 模型和二次流塑性 (secondary flow plastic, S-FP) 模型,建立了随腐蚀时间演化的拉伸本构模型。本文结果为理解铁素体不锈钢在腐蚀环境下的服役和力学性能演化提供了试验和理论依据,并为其进一步推广和应用奠定了基础。

## 1 试验概况

### 1.1 试样

目前,山西太钢不锈钢股份有限公司研发的 TSZ410 铁素体不锈钢已成功应用于高速公路护栏、建筑屋面等场景,如图 1 所示。选用该公司提供的 TSZ410 铁素体不锈钢,参照《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》<sup>[11]</sup>制作标准试件,并选取 Q420 钢作为对比组。按照加速腐蚀时间  $t$  分别为 0 d、20 d、40 d、60 d、80 d、100 d 和 120 d,将每类试件分为 7 组,每组 2 个平行试件。采用“钢材-天数”的

形式来标识试件, 例如“TSZ410-40”表示腐蚀 40 d 的 TSZ410 钢试件. 由于材料供给差异, TSZ410 钢试件厚度为 5 mm, Q420 钢试件厚度为 6 mm, 具体几何尺寸见图 2.



(a) 高速公路护栏 (b) 建筑屋面

图 1 铁素体不锈钢工程应用实例

Fig.1 Engineering applications of ferritic stainless steel

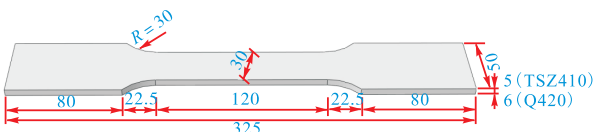


图 2 试件的几何尺寸(单位: mm)

Fig.2 Geometric dimensions of specimens (unit: mm)

对 Q420 钢和 TSZ410 钢各 3 个试件开展材料性能试验, 应力-应变曲线如图 3 所示(其中 3 条实线和 3 条虚线分别对应 3 个 TSZ410 钢试件和 3 个 Q420 钢试件), 并提取力学性能参数列于表 1 (屈服强度  $f_y$ 、极限强度  $f_u$ 、断后伸长率  $\delta$  及断面收缩率  $\phi$ ), 二者化学成分(质量分数)如表 2 所示. 可以看出, Q420 钢的力学性能和化学成分均符合标准<sup>[12]</sup>要求, TSZ410 铁素体不锈钢虽无匹配标准, 但其化学成分满足现行标准关于传统铁素体不锈钢 S11213 的要求<sup>[13]</sup>, 且力学性能远超过该标准限值, 屈服强度  $f_y$  和极限强度  $f_u$

的均值分别为 489.8 MPa 和 560.9 MPa, 较传统铁素体不锈钢规范的限值分别提升 75% 和 24%. TSZ410 钢的断后伸长率亦满足标准要求, 表现出高强度与优异塑性的协同匹配. TSZ410 钢的力学性能与 Q420 钢接近, 其  $f_y$  和  $f_u$  的均值较 Q420 钢分别高 65.7 MPa 和 21.0 MPa.

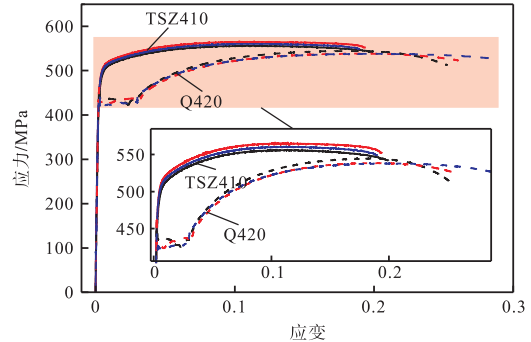


图 3 Q420 钢和 TSZ410 钢静力拉伸的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of Q420 and TSZ410 steel under static tension

表 1 TSZ410 钢、S11213 钢和 Q420 钢的力学性能参数

Tab.1 Mechanical parameters of TSZ410, S11213 and Q420 steel

钢材	标准	$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa	$\delta$ /%	$\phi$ /%
TSZ410	—	483.50	556.00	18.86	59.78
	—	494.93	566.21	18.57	67.13
	—	490.95	560.46	19.29	62.73
S11213	GB/T 3280—2015 <sup>[13]</sup>	$\geq 280.00$	$\geq 450.00$	$\geq 18.00$	—
	—	426.76	537.32	27.86	50.46
	—	421.37	543.19	30.43	51.49
Q420	—	424.19	539.15	28.86	50.18
	—	$\geq 420.00$	520.00 ~ 680.00	$\geq 20.00$	—
	GB/T 1591—2018 <sup>[12]</sup>	$\geq 420.00$	$\geq 520.00$	$\geq 20.00$	—

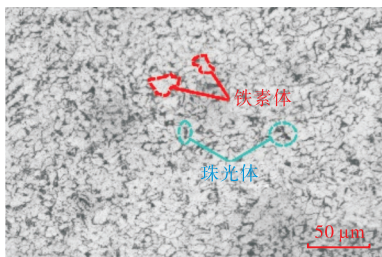
表 2 TSZ410 钢、S11213 钢和 Q420 钢的化学成分

Tab.2 Chemical composition of TSZ410, S11213 and Q420 steel

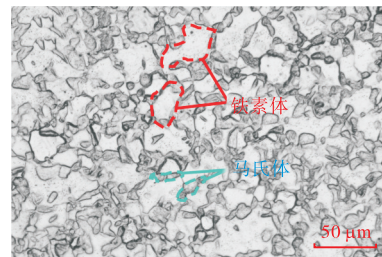
钢材	$w_C$ /%	$w_{Si}$ /%	$w_{Mn}$ /%	$w_P$ /%	$w_S$ /%	$w_{Ni}$ /%	$w_{Cr}$ /%	$w_N$ /%
TSZ410	$\leq 0.060$	$\leq 1.000$	$\leq 3.000$	$\leq 0.040$	$\leq 0.015$	0.800	11.000 ~ 14.000	$\leq 0.030$
S11213	0.030	1.000	1.500	0.040	0.150	0.300 ~ 1.000	10.500 ~ 12.500	0.030
Q420	$\leq 0.200$	$\leq 0.500$	$\leq 1.700$	$\leq 0.030$	$\leq 0.030$	$\leq 0.800$	$\leq 0.300$	$\leq 0.015$

从 Q420 钢和 TSZ410 钢母材上独立切割出试样, 尺寸分别为 10 mm × 10 mm × 6 mm 和 10 mm × 10 mm × 5 mm, 参考《金属显微组织检验方法》<sup>[14]</sup>, 经过镶嵌、打磨、细致抛光和酸洗处理, 在金相显微

镜下观察两种钢材的金相组织, 如图 4 所示. 由图 4 可以看出, Q420 钢以铁素体为主, 珠光体呈条带状分布于铁素体晶界; TSZ410 钢则呈现铁素体与马氏体的复相结构, 两相体积分数相近. Q420 钢中铁素



(a) Q420 钢



(b) TSZ410 钢

图 4 Q420 钢和 TSZ410 钢的金相组织

Fig.4 Metallographic structure of Q420 and TSZ410 steel

体的高比例使其微观结构相对均匀,TSZ410 钢中高含量的马氏体赋予其较高的硬度,从而提高了其屈服强度.

### 1.2 加速腐蚀试验

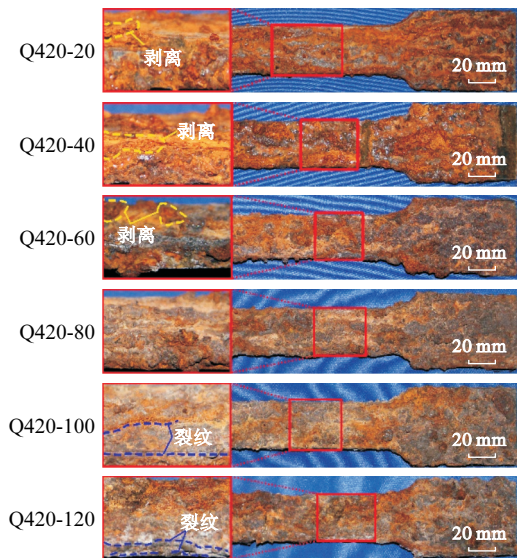
采用中性盐雾腐蚀试验模拟长期腐蚀环境<sup>[15-16]</sup>,借助 YWX/F-010 盐雾腐蚀箱开展 TSZ410 钢和 Q420 钢的中性盐雾试验,如图 5 所示.参考《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》<sup>[17]</sup>,采用符合指标的工业氯化钠与纯净水调配(50±5)g/L 的氯化钠溶液,控制溶液 PH 值在 6.5~7.2 的范围内,腐蚀试验箱内部温度维持在 35℃,进行不间断的喷雾,同时满足 80cm<sup>2</sup> 集雾漏壶盐雾沉降量为 1~2 mL/h.在盐雾箱内腐蚀达到规定的天数后,对试件进行相应记录与处理,之后参考 ASTM G1-03<sup>[18]</sup>使用符合规定的除锈剂溶液和超声波清洗器对样品进行除锈与清洁.



图 5 中性盐雾试验试验机  
Fig.5 Neutral salt spray test machine

### 1.3 锈层成分分析

采用无损取样技术分别获取每个腐蚀时间下的完整外侧锈层粉末 0.5 g,采用 Bruker D8 Advance 仪器开展基于 XRD 物相分析,以探究和对比两种钢材不同腐蚀时间下外侧锈层的物相组成及其相对含量,识别主要腐蚀产物的形成及转化机制.



(a) Q420 钢

### 1.4 力学试验加载制度

采用 SHT4605 微机控制电液伺服万能试验机,对不同腐蚀时间下的两种钢材开展拉伸试验.将 1 个标距为 50 mm(量程 25 mm)的引伸计连接到试验机控制器上,在拉伸试验开始前将引伸计安装到试件的中心位置,如图 6 所示.参考《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》<sup>[11]</sup>,整个加载过程由应变速率(0.000 25/s)控制,则位移加载速率设定为 1.8 mm/min.试验过程中详细记录应力-应变曲线,并提取各项力学性能参数.

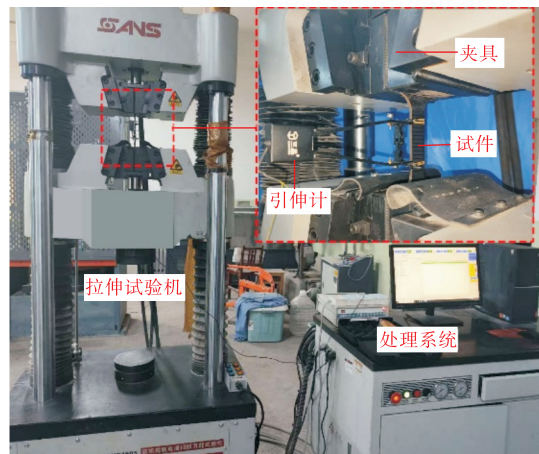
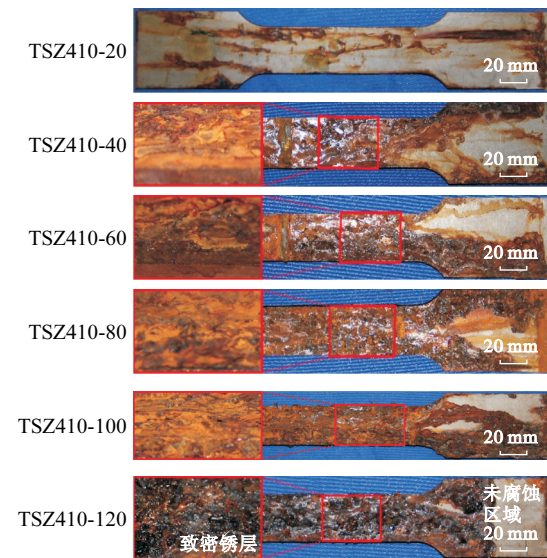


图 6 拉伸试验加载装置  
Fig.6 Tensile test loading device

## 2 腐蚀演化分析

### 2.1 腐蚀形貌

图 7 为 TSZ410 钢与 Q420 钢在不同腐蚀时间下的腐蚀形貌.随着腐蚀时间的增加,Q420 钢的锈层



(b) TSZ410 钢

图 7 Q420 钢和 TSZ410 钢在不同腐蚀时间下的宏观形貌

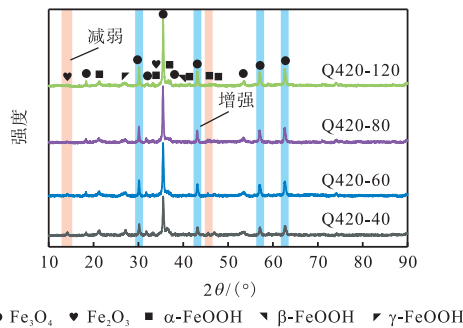
Fig.7 Macroscopic morphology of Q420 and TSZ410 steel under different corrosion periods

逐渐呈现深褐色, 而 TSZ410 钢的锈层则转变为黑褐色. Q420 钢的锈层较厚, 在 20 d 时已被锈层完全覆盖且伴随着局部锈层剥离现象. TSZ410 钢的锈层较薄且致密, 可抑制侵蚀性介质的渗入, 在 120 d 时仍保留夹持端的未腐蚀区域, 始终未出现锈层剥落现象. Q420 钢在 100 d 时因锈层膨胀开始出现裂纹, 并且随着时间推移, 裂纹愈加明显, 而 TSZ410 钢的锈层始终未出现明显裂纹.

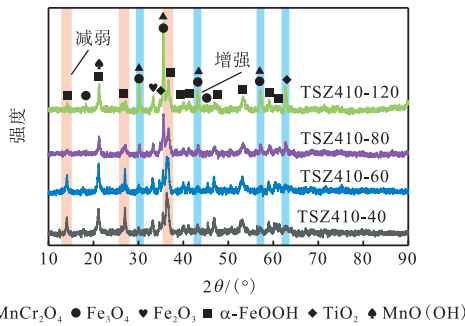
2.2 锈层演化分析

为获取两种钢外侧锈层的物相组成, 参照标准 ASTM G1-03<sup>[18]</sup>使用不锈钢刀片沿试样表面轻刮外侧锈层, 以避免对基体造成损伤. 刮取的粉末经过筛网过滤、超声清洗及真空干燥后进行 XRD 测试, 以确保样本的纯度.

图 8(a) 为 Q420 钢在不同腐蚀时间下的外侧锈层 XRD 强度图谱. Q420 钢在腐蚀全程均保持以 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 为主导的锈层结构, 该相自腐蚀初期即持续累积, 其衍射强度随腐蚀时间延长呈增长趋势. 值得注意的是, 初始形成的 α-FeOOH 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相在腐蚀过程中持续转化为更稳定的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 相. 这种物相转化贯穿整个腐蚀周期, 导致锈层孔隙率不断增加, 为腐蚀介质扩散提供通道, 加速了 Q420 钢的劣化.



(a) Q420 钢



(b) TSZ410 钢

图 8 Q420 钢和 TSZ410 钢外侧锈层的 XRD 图谱

Fig.8 XRD spectra of outside rust layers of Q420 and TSZ410 steel

图 8(b) 为 TSZ410 钢在不同腐蚀时间下的外侧锈层 XRD 强度图谱. 在腐蚀初期 (0 ~ 60 d), Cl<sup>-</sup> 小范

围穿透 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 钝化层, 诱发 MnO(OH) 与 α-FeOOH 共生, 形成复合氧化物层. 尽管此复合锈层具有一定防护性, 其微观结构仍较疏松. 80 d 后, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层完全溶解, 基体中的 Mn/Cr 元素与腐蚀介质反应生成 MnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, 同时 α-FeOOH 逐渐转化为更稳定的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. 到 120 d 时, 钢材表面形成的 MnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 相与 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 基质逐渐形成黑褐色的致密复合锈层, 并且 Ti 元素氧化形成的 TiO<sub>2</sub> 均匀分散, 进一步增强了屏障效应. 这种动态演化的多层结构显著降低了锈层的孔隙率, 有效抑制了腐蚀介质 (Cl<sup>-</sup>) 的渗透.

2.3 质量损失率

质量损失率 (η) 是衡量腐蚀程度的核心指标, 其计算公式如式 (1)<sup>[19]</sup> 所示. 表 3 为不同腐蚀时间下 TSZ410 钢和 Q420 钢的所有试验数据. 两种钢的 η-t 曲线见图 9, 可见随着腐蚀天数的增加, 两种钢材质量损失率均随腐蚀天数呈幂函数增加, 如式 (2)、(3) 所示.

$$\eta = \frac{m_0 - m_c}{m_0} \tag{1}$$

式中 m<sub>0</sub> 和 m<sub>c</sub> 分别为试件初始质量和除锈后的剩余质量, 二者单位均为 g.

TSZ410 的质量损失率计算式为

$$\eta = 0.000\ 02t^{1.399}, R^2 = 0.95 \tag{2}$$

Q420 的质量损失率计算式为

$$\eta = 0.001\ 74t^{0.893}, R^2 = 0.98 \tag{3}$$

表 3 Q420 钢和 TSZ410 钢的腐蚀数据

Tab.3 Corrosion data for Q420 and TSZ410 steel

t/d	TSZ410			Q420		
	m <sub>0</sub> /g	m <sub>c</sub> /g	η/%	m <sub>0</sub> /g	m <sub>c</sub> /g	η/%
0	500.98	500.98	0	594.83	594.83	0
	501.15	501.15	0	594.16	594.16	0
	500.73	500.73	0	596.47	596.47	0
20	498.40	498.37	0.006	594.13	580.34	2.321
	498.17	498.14	0.006	601.44	583.52	2.980
40	498.40	497.45	0.191	593.24	558.22	5.903
	498.27	497.38	0.179	597.04	565.77	5.238
60	498.18	493.93	0.853	591.85	556.17	6.029
	499.43	495.28	0.831	597.11	557.15	6.692
80	498.18	492.51	1.138	596.76	547.06	8.328
	503.72	498.09	1.118	591.28	546.04	7.651
100	504.71	495.83	1.759	597.30	537.46	10.018
	504.71	497.91	1.347	593.69	530.16	10.701
120	504.67	496.20	1.678	597.43	516.73	13.508
	504.83	495.94	1.761	597.38	520.72	12.833

在 120 d 的腐蚀周期内, TSZ410 钢的质量损失率仅为 1.76%, 而 Q420 钢的质量损失率已达到 13.51%, 这表明 TSZ410 钢在抗腐蚀能力上显著优于 Q420 钢. 虽然 TSZ410 钢表面仍会出现锈层, 但其质

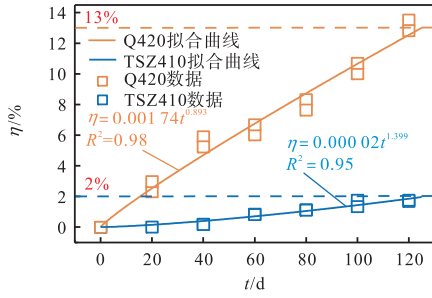


图 9 Q420 钢和 TSZ410 钢的腐蚀动力学曲线

Fig.9 Corrosion kinetic curves of Q420 and TSZ410 steel

量损失率依然较低,这主要是因为其锈层中含有大量的铬元素,能与氧气反应形成致密的氧化铬薄膜,从而有效阻止腐蚀介质的深入.这使得 TSZ410 钢在腐蚀前期展现出极强的耐腐蚀性能.

对于不同尺寸的试件,即使初始质量相同,质量损失率也会有很大的差异<sup>[19]</sup>.腐蚀是从试件表面开始发展,沿着试件厚度不断深入,因此平均厚度损失( $\Delta h$ )<sup>[19]</sup>能更加直观表示不同尺寸和形状试件的腐蚀程度,如式(4)所示.对比不同腐蚀条件下多种钢材<sup>[19-26]</sup>的 $\Delta h-t$ 曲线(图 10),可以看出不同腐蚀条件下钢材的 $\Delta h$ 基本上按照幂函数(式(5))<sup>[19]</sup>增长.

$$\Delta h = \eta h_0 \quad (4)$$

式中  $h_0$  为试件厚度.

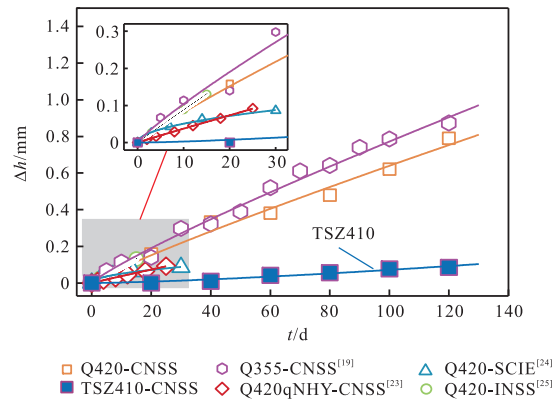
$$\Delta h = at^b \quad (5)$$

式中:  $a$  为本征腐蚀动力学系数;  $b$  为时变腐蚀非线性指数.

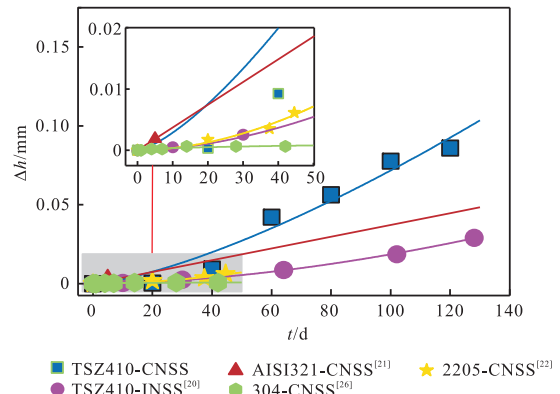
图 10 包括可模拟海洋大气环境的连续中性盐雾 (continuous neutral salt spray, CNSS)<sup>[19]</sup>、可模拟潮汐区腐蚀环境的间歇中性盐雾 (intermittent neutral salt spray, INSS)<sup>[25]</sup>以及可模拟地下管网高盐缺氧环境的氯化钠浸泡 (sodium chloride immersion, SCIE)<sup>[24]</sup>的腐蚀试验数据.图 10(a)对比了低合金钢 Q420<sup>[24-25]</sup>、Q420qNHY<sup>[23]</sup>及 Q355 钢<sup>[19]</sup>在不同腐蚀环境下的 $\Delta h-t$ 曲线,相关参数列于表 4.可以看出,INSS 环境中的参数  $b$  始终大于 CNSS 中的对应值. Q420 钢在 SCIE 中的腐蚀速率显著低于 CNSS 中的对应值,这可能与

前者较低的溶氧浓度有关. INSS 的周期性干湿循环加速氧扩散与电解液渗透,促使生成疏松多孔的锈层,导致 Q420 钢的腐蚀劣化程度与 CNSS 接近.此外,在 CNSS 环境中腐蚀速率从小到大依次为 Q420qNHY 耐候钢、Q420 钢和 Q355 钢.即便如此,TSZ410 钢的腐蚀速率 0.0007 mm/d (0.2527 mm/a) 仍远低于 Q420qNHY 耐候钢,表现出其优越的抗腐蚀性.

图 10(b)为 TSZ410 钢<sup>[20]</sup>、奥氏体 321 钢<sup>[21]</sup>、奥氏体 304 钢<sup>[26]</sup>及 2205 双相体不锈钢<sup>[22]</sup>在不同腐蚀环境下的  $\Delta h-t$  曲线,相关参数也列于表 4.可以看出,不锈钢的参数  $a$  均远小于低合金钢的对应值,表



(a) 低合金钢的 $\Delta h-t$ 曲线



(b) 不锈钢的 $\Delta h-t$ 曲线

图 10 多种钢材在不同腐蚀条件下的 $\Delta h-t$ 曲线

Fig.10  $\Delta h-t$  curves of different steels under different corrosion conditions

表 4 多种钢材在不同腐蚀条件下的腐蚀参数

Tab.4 Corrosion parameters of different steels under different corrosion conditions

不锈钢				低合金钢			
腐蚀环境	类别	$a$	$b$	腐蚀环境	类别	$a$	$b$
CNSS	TSZ410	0.000 110	1.398 300	CNSS	Q420	0.010 400	0.894 420
INSS	TSZ410 <sup>[20]</sup>	0.000 005	1.771 030	INSS	Q420 <sup>[25]</sup>	0.009 430	0.971 990
CNSS	AISI321 <sup>[21]</sup>	0.000 370	1.000 000	CNSS	Q355 <sup>[19]</sup>	0.014 050	0.869 960
CNSS	304 <sup>[26]</sup>	0.000 110	0.504 580	CNSS	Q420qNHY <sup>[23]</sup>	0.004 060	0.967 020
CNSS	2205 <sup>[22]</sup>	0.000 004	1.869 330	SCIE	Q420 <sup>[24]</sup>	0.016 270	0.495 650

明其初始腐蚀速率较低. 在 CNSS 环境中, 腐蚀速率从小到大依次为奥氏体 304 钢、2205 双相体不锈钢、奥氏体 321 钢和 TSZ410 钢, 其中奥氏体 321 钢与 TSZ410 钢的腐蚀速率接近, 即 TSZ410 钢在中性盐雾中虽具有尚好的抗腐蚀性能, 但仍逊色于奥氏体 304 钢和 2205 双相体不锈钢. 然而, TSZ410 钢在 INSS 的腐蚀速率与 2205 双相体不锈钢在 CNSS 的腐蚀速率基本相同, 且显著低于 TSZ410 钢在 CNSS 的腐蚀速率, 其机制源于 INSS 的周期性干燥条件, 间歇盐雾促进 Cr 氧化形成致密 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 钝化膜, 有效阻隔 Cl<sup>-</sup> 渗透. 因此, 鉴于其出色的抗腐蚀性能, 推荐在海洋大气环境中直接使用 TSZ410 钢. 在潮汐区或工业带腐蚀环境使用时, 建议将 TSZ410 钢与其他不锈钢进行综合对比, 以兼顾力学和腐蚀性能.

### 3 力学性能分析

#### 3.1 断裂模式

Q420 钢和 TSZ410 钢的断口宏观形貌如图 11 所示. 在未腐蚀状态下两种钢材的断口均显示出明显的颈缩现象, 表明它们经历了较大的塑性变形. 随着腐蚀时间的增长, Q420 钢的颈缩现象消失 (腐蚀 80 d 以后), 且断口截面由于蚀坑影响不再平整, 表现出脆性断裂特征. 相比之下, TSZ410 钢在 120 d 内始终保持明显的颈缩现象且断口截面均较为平整, 在腐蚀环境下仍表现出了出色的塑性变形能力.

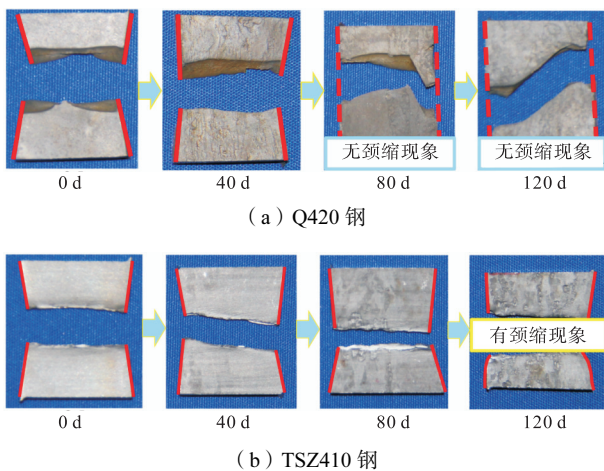


图 11 Q420 钢和 TSZ410 钢的断裂模式

Fig.11 Fracture modes of Q420 and TSZ410 steel

#### 3.2 强度指标分析

根据各试件的实际几何尺寸, 通过拉伸试验获得两种钢材在不同腐蚀时间下的应力-应变曲线, 如图 12 所示. 由图 12 可以看出, 随着腐蚀时间的增加, 两种钢材的应力-应变曲线均表现出下降的趋势. 在

120 d 以内, Q420 钢的下降幅度明显, 但始终存在屈服平台. TSZ410 钢的波动和下降幅度相对较小. 由于在相同腐蚀时间下的应力-应变曲线较为接近, 分别提取在不同腐蚀时间下两种钢材的强度参数 (屈服强度  $f_y$ 、极限强度  $f_u$  和断裂强度  $f_f$ ) 及应变参数 (硬化应变  $\epsilon_h$ 、极限应变  $\epsilon_u$  和断裂应变  $\epsilon_f$ ) 的均值列于表 5.

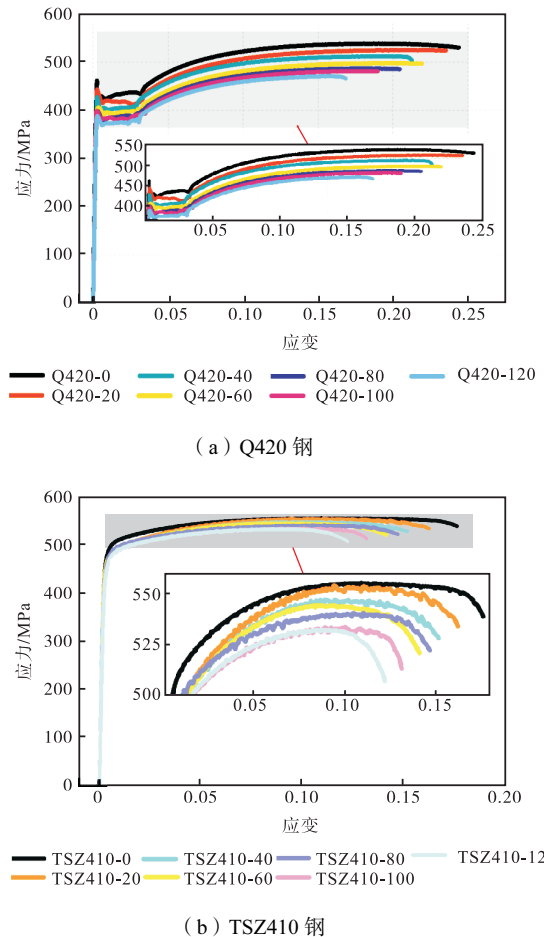


图 12 Q420 钢和 TSZ410 钢在不同腐蚀时间下的应力-应变曲线

Fig.12 Stress-strain curves of Q420 and TSZ410 steel under different corrosion periods

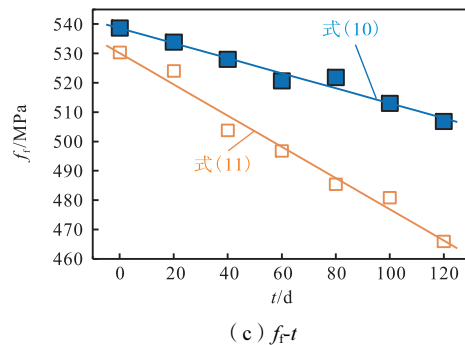
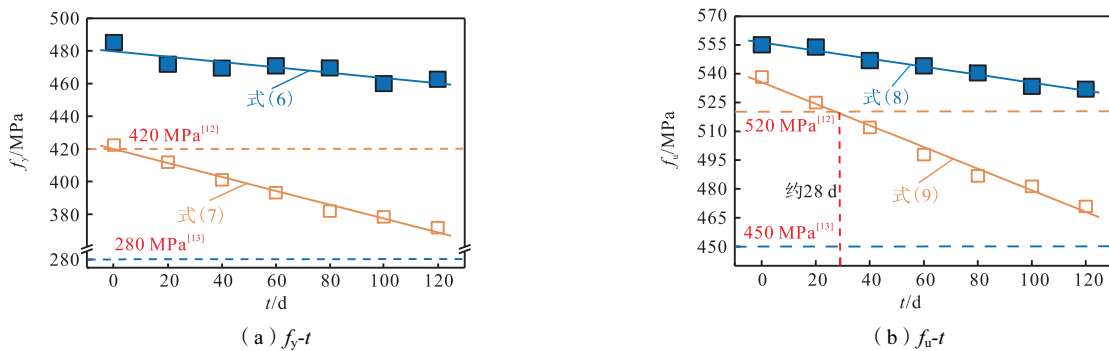
将 Q420 钢和 TSZ410 钢强度指标与腐蚀时间的关系绘于图 13. 从图 13 (a) 可以看出, 二者的屈服强度  $f_y$  随腐蚀时间  $t$  的增加呈线性下降, 如表 6 中式 (6) 和式 (7) 所示. 腐蚀 20 d 后, Q420 钢的  $f_y$  便不满足规范<sup>[12]</sup> 限值, 腐蚀 120 d 时, 其  $f_y$  降幅甚至高达 11.96%. 相比之下, TSZ410 钢的  $f_y$  仅下降 4.65%, 且其  $f_y$  始终高于 S11213 钢的规范<sup>[13]</sup> 限值 (280 MPa), 这是因为 TSZ410 钢表面生成的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜能有效抵抗腐蚀, 显著延缓了腐蚀介质对基体的侵蚀作用.

由图 13 (b) 可知, Q420 钢和 TSZ410 钢的极限强度  $f_u$  随腐蚀时间  $t$  的增加呈线性下降, 如式 (8) 和 (9) 所示. 可以看出, 两种钢材的初始  $f_u$  相近, Q420 钢的

表 5 Q420 钢和 TSZ410 钢在不同腐蚀时间下的强度和应变参数

Tab.5 Strength and strain parameters of Q420 and TSZ410 steel under different corrosion periods

t/d	强度参数						应变参数					
	$f_y$ /MPa		$f_u$ /MPa		$f_t$ /MPa		$\epsilon_h$		$\epsilon_u$		$\epsilon_f$	
	Q420	TSZ410	Q420	TSZ410	Q420	TSZ410	Q420	TSZ410	Q420	TSZ410	Q420	TSZ410
0	422.33	485.17	538.38	555.09	530.32	538.63	0.031 90	0.004 11	0.187 48	0.108 99	0.243 81	0.175 64
20	411.85	471.84	525.04	553.92	524.05	533.80	0.030 55	0.004 35	0.202 76	0.094 26	0.253 04	0.161 90
40	401.05	469.43	512.11	546.86	503.77	528.00	0.028 11	0.004 05	0.192 67	0.089 03	0.212 60	0.151 26
60	393.18	470.88	497.89	544.13	496.76	520.63	0.028 58	0.004 18	0.192 14	0.084 63	0.219 23	0.140 93
80	382.00	469.59	486.81	540.41	485.41	521.81	0.026 94	0.004 29	0.181 04	0.110 14	0.204 50	0.146 63
100	378.41	459.96	481.40	533.43	480.87	512.96	0.023 61	0.004 27	0.181 11	0.100 22	0.189 81	0.130 09
120	371.84	462.59	470.90	532.00	465.96	506.81	0.023 35	0.004 45	0.157 75	0.084 84	0.168 37	0.121 99



□ Q420数据 ■ TSZ410数据 — Q420拟合曲线 — TSZ410拟合曲线

图 13 Q420 钢和 TSZ410 钢强度指标与腐蚀时间之间的关系

Fig.13 Relationships between strength indexes of Q420 and TSZ410 steel and corrosion periods

表 6 Q420 钢和 TSZ410 钢在不同腐蚀时间下的强度劣化关系

Tab.6 Strength deterioration relationships for Q420 and TSZ410 steel under different corrosion periods

强度指标	TSZ410 的关系式	编号	Q420 的关系式	编号
$f_y$	$f_y = 479.71 - 0.136 11t, R^2 = 0.76$	(6)	$f_y = 419.82 - 0.423 93t, R^2 = 0.98$	(7)
$f_u$	$f_u = 556.20 - 0.208 39t, R^2 = 0.98$	(8)	$f_u = 535.54 - 0.562 54t, R^2 = 0.98$	(9)
$f_t$	$f_t = 538.59 - 0.255 95t, R^2 = 0.97$	(10)	$f_t = 530.07 - 0.531 79t, R^2 = 0.98$	(11)

$f_u$  在加速腐蚀 28 d 后便低于规范<sup>[12]</sup>限值(520 MPa), 腐蚀 120 d 后, 其  $f_u$  下降了 12.53%。相比之下, TSZ410 钢的劣化幅度较小,  $f_u$  最多仅下降 4.16%, 且始终高于 S11213 钢的规范<sup>[13]</sup>限值(450 MPa)。

图 13(c) 为断裂强度  $f_t$  与  $t$  的线性下降关系, 如式(10)和(11)所示。可以看出, 两种钢材的  $f_t-t$  曲线差异相比于  $f_y-t$  和  $f_u-t$  曲线更小, TSZ410 钢的  $f_t-t$  曲线下降速率较  $f_y$  和  $f_u$  有一定程度增大, 但仍小于 Q420 钢的对应值, 且其强度也始终大于 Q420 钢。

### 3.3 应变指标分析

图 14(a) 和(b) 为 Q420 钢和 TSZ410 钢的硬化应变  $\epsilon_h$ 、极限应变  $\epsilon_u$  随腐蚀时间的增加而发生的劣化对比, 如表 7 中的式(12)~(15)所示, Q420 钢的初始应变均高于 TSZ410 钢, 但前者表现出明显的线性下降趋势。TSZ410 钢的  $\epsilon_h$  和  $\epsilon_u$  几乎不随时间变化, 显示出其优越的耐腐蚀性能。腐蚀使 Q420 钢的  $\epsilon_h$  和  $\epsilon_u$  减小, 导致其屈服后硬化能力下降, 更易发生脆性断裂。

图 14(c) 为二者断裂应变  $\varepsilon_f$  与腐蚀天数的关系, 如式(16)和(17)所示, Q420 钢和 TSZ410 钢的  $\varepsilon_f$  均随  $t$  线性下降, 这主要因为蚀坑缺陷导致局部应力集

中, 加速了裂纹的扩展. 总体而言, TSZ410 钢的下降更为平缓.

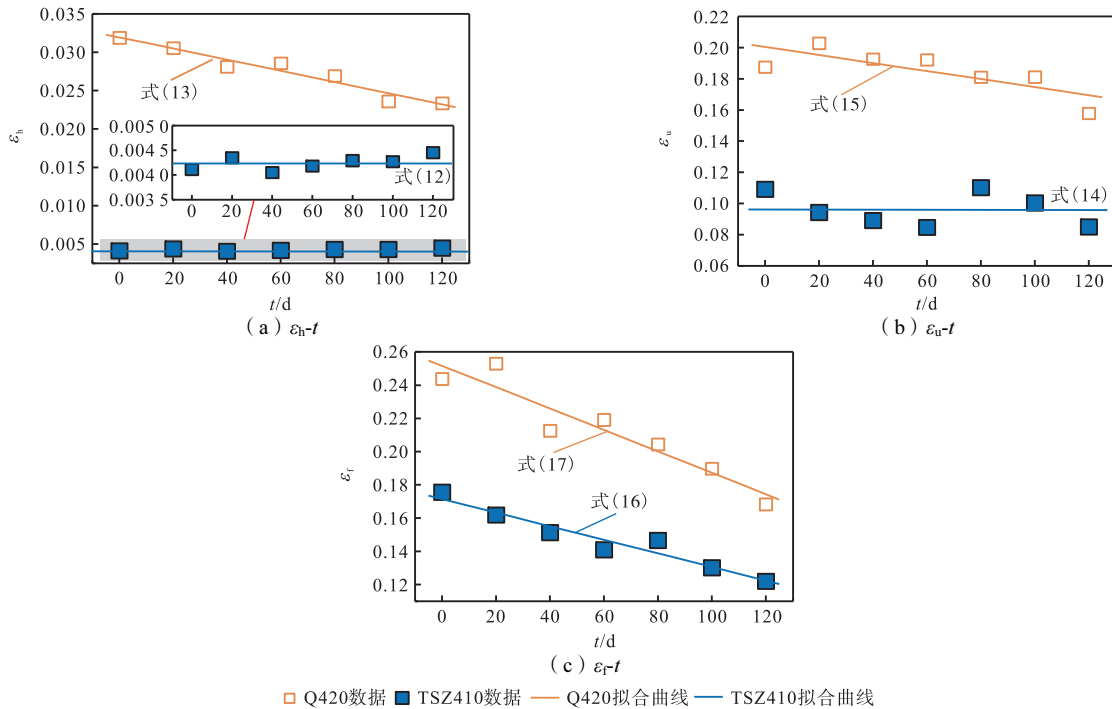


图 14 Q420 钢和 TSZ410 钢应变指标和腐蚀时间的关系

表 7 Q420 钢和 TSZ410 钢应变指标、 $E$ 、 $\delta$  和腐蚀时间的关系

Tab.7 Relationships of strain indexes,  $E$  and  $\delta$  of Q420 and TSZ410 steel with corrosion periods

参数	TSZ410 的关系式	编号	Q420 的关系式	编号
$\varepsilon_h$	$\varepsilon_h = 0.00424$	(12)	$\varepsilon_h = 0.03194 - 0.00007t, R^2 = 0.94$	(13)
$\varepsilon_u$	$\varepsilon_u = 0.09602$	(14)	$\varepsilon_u = 0.20043 - 0.00026t, R^2 = 0.62$	(15)
$\varepsilon_f$	$\varepsilon_f = 0.17148 - 0.00041t, R^2 = 0.93$	(16)	$\varepsilon_f = 0.25172 - 0.00064t, R^2 = 0.90$	(17)
$E$	$E = 224711 - 202.128t, R^2 = 0.85$	(18)	$E = 213569 - 215.771t, R^2 = 0.86$	(19)
$\delta$	$\delta = 0.19942 - 0.0004t, R^2 = 0.85$	(20)	$\delta = 0.28228 - 0.0011t, R^2 = 0.88$	(21)

### 3.4 弹性模量与断后伸长率

图 15 为 Q420 钢和 TSZ410 钢的弹性模量  $E$  随腐蚀时间劣化的对比, 该参数是衡量材料刚度的重要指标, 劣化关系列于表 7. 随着腐蚀时间的增加, 两种钢材的  $E$  均呈线性下降, 且下降速率相近. Q420 钢的  $E$  在约 35 d 后便不满足一般钢材要求的 206 GPa, 而 TSZ410 钢需加速腐蚀 92 d. 值得注意的是, 在整个腐蚀周期下, TSZ410 钢的  $E$  始终高于 Q420 钢的对应值, 即使在腐蚀 120 d 时, TSZ410 钢的  $E$  仍维持在 200 GPa 以上, 能维持较好的刚度.

图 16 为 TSZ410 钢和 Q420 钢的断后伸长率  $\delta$  与腐蚀时间的关系, 该参数是衡量材料塑性的重要指标,  $\delta-t$  关系列于表 7. 两者的  $\delta$  均随腐蚀时间线性减小. Q420 钢在 74 d 后不满足规范 GB/T 21591—2018<sup>[12]</sup> 的限值(20%). 相比之下, TSZ410 钢虽初始  $\delta$

较小, 但下降速率也较小, 在腐蚀 48 d 后不满足规范 GB/T 3280—2015<sup>[13]</sup> 的限值(18%). 然而,  $\delta$  在腐蚀周期内始终保持在 15% 以上, 始终表现出可接受的塑性变形能力, 推荐在塑性变形要求并不严苛的腐蚀环境中使用.

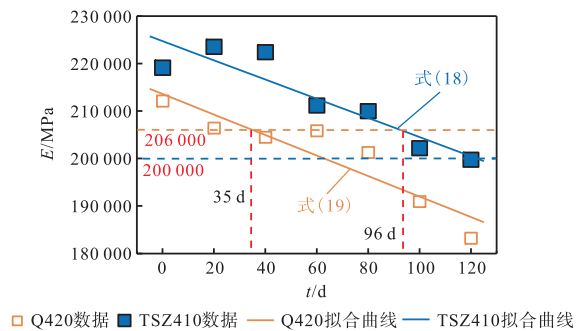


图 15 Q420 钢和 TSZ410 钢的弹性模量

Fig.15 Elastic modulus of Q420 and TSZ410 steel

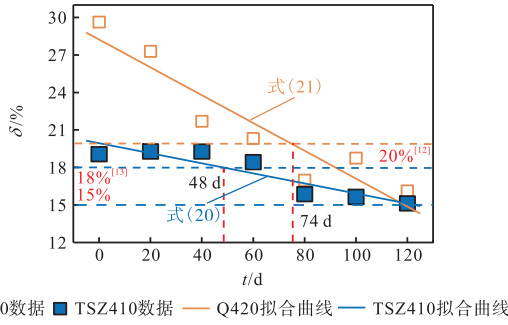


图 16 Q420 钢和 TSZ410 钢的断后伸长率

Fig.16 Elongation rate after break of Q420 and TSZ410 steel

### 4 拉伸本构模型

#### 4.1 Q420 钢本构模型

钢材腐蚀后的本构模型对今后腐蚀环境下钢结构数值模型的建立及性能评估具有重要指导意义. 因此, 尝试引入腐蚀的影响, 建立两种钢材的本构模型. 对于 Q420 钢, 尝试采用 D-H 模型<sup>[27]</sup>和 S-FP 模型<sup>[28]</sup>建立其腐蚀后的本构, 如式 (22) 和 (23) 所示.

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_h \\ f_u + (f_y - f_u) \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon}{\varepsilon_u - \varepsilon_h} \right)^{m_1} & \varepsilon_h < \varepsilon \leq \varepsilon_u \\ f_u - (f_u - f_f) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_u}{\varepsilon_f - \varepsilon_u} \right)^{m_2} & \varepsilon_u < \varepsilon \leq \varepsilon_f \end{cases} \quad (22)$$

式中  $m_1$  和  $m_2$  为控制硬化段和颈缩段的形状参数.

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y < \varepsilon \leq k_1 \varepsilon_y \\ k_3 f_y + \frac{E(1-k_3)}{\varepsilon_y(k_2-k_1)^2} (\varepsilon - k_2 \varepsilon_y)^2 & k_1 \varepsilon_y < \varepsilon \leq k_2 \varepsilon_y \\ f_u & \varepsilon \geq k_2 \varepsilon_y \end{cases} \quad (23)$$

式中  $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_3$  分别为硬化应变和屈服应变、极限应变和屈服应变以及极限强度和屈服强度的比值.

上述两个模型中, 可结合表 6、表 7 及图 12, 拟合不同腐蚀时间下的参数  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_3$ , 见表 8, 进而建立它们与加速腐蚀时间的关系, 如式 (24) 和 (25) 所示, 在此基础上即可构建 Q420 钢腐蚀后的本构模型.

$$\begin{cases} m_1 = 5.28683 - 0.05039t + 0.003t^2 \\ m_2 = 2.59821 - 0.00755t \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} k_1 = 16.24726 - 0.03698t \\ k_2 = 98.74314 - 3.05 \times 10^{-7} t^{3.73557} \\ k_3 = 1.27549 - 3.81 \times 10^{-14} t^{5.47184} \end{cases} \quad (25)$$

表 8 Q420 钢腐蚀后本构模型参数

Tab.8 Parameters of constitutive model of Q420 steel after corrosion

试样	D-H 模型		S-FP 模型		
	$m_1$	$m_2$	$k_1$	$k_2$	$k_3$
Q420-0	5.319 71	2.670 18	16.228 03	95.374 01	1.274 79
Q420-20	4.166 02	2.713 64	15.541 10	103.146 09	1.274 83
Q420-40	4.213 94	2.941 67	14.299 69	98.012 12	1.276 92
Q420-60	3.071 83	2.917 96	14.538 61	97.741 37	1.266 32
Q420-80	3.060 10	3.134 61	13.704 18	92.093 71	1.274 37
Q420-100	3.422 72	3.467 31	12.010 08	92.128 15	1.272 17
Q420-120	3.520 00	3.512 45	11.877 67	80.244 19	1.266 40

为了验证模型的准确性, 分别利用 D-H 模型和 S-FP 模型建立了 Q420 钢的应力-应变曲线, 并与典型腐蚀时间 (0 d、60 d 和 120 d) 下的试验曲线进行对比, 如图 17 所示. 可以看出, 在硬化和颈缩阶段, D-

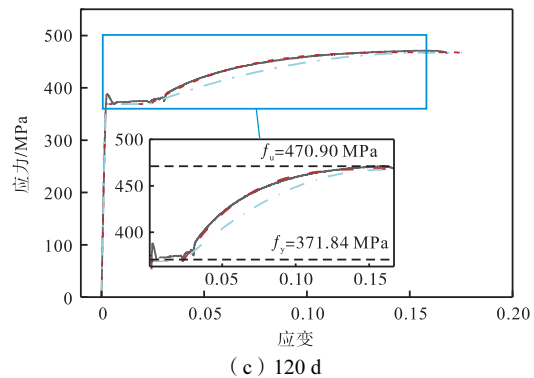
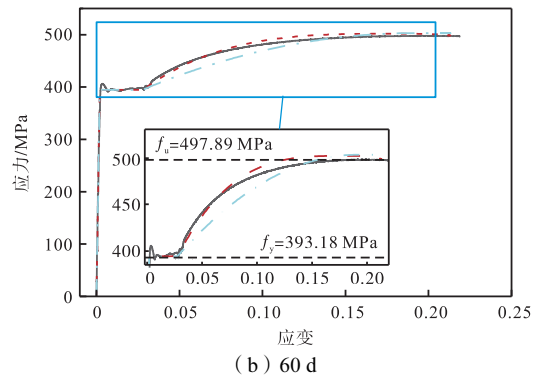
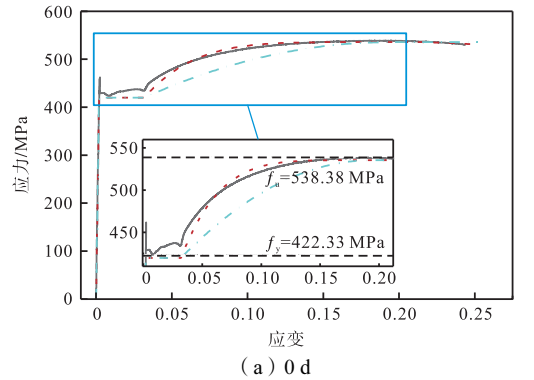


图 17 Q420 钢试验曲线与本构模型对比

Fig.17 Comparison of Q420 steel test curve with constitutive models

H 模型表现出与试验曲线更好的吻合度. 此外, 提取并计算了不同腐蚀天数下应力-应变曲线 1/4、1/2 和 3/4 点处的误差, 如图 18 所示. 可见, D-H 模型的误差仅为 1.53%, 而 S-FP 模型的误差为 7.25%, 是 D-H 模型的 4.7 倍. 这是由于 S-FP 模型未考虑动态腐蚀损伤对 Q420 钢颈缩阶段的影响, 而 D-H 模型通过精准捕捉应变硬化与颈缩效应, 能够更好反映腐蚀环境下 Q420 钢的本构模型.

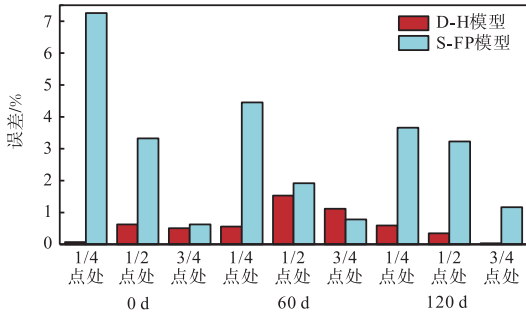


图 18 Q420 钢静力拉伸本构模型误差分析

Fig.18 Error analysis of static tensile constitutive models of Q420 steel

### 4.2 TSZ410 钢本构模型

针对 TSZ410 钢, 尝试采用 R-O 模型和修正的 D-H 模型建立其腐蚀后的本构模型. R-O 模型将材料的总应变  $\varepsilon$  分解为弹性应变  $\varepsilon_e$  和塑性应变  $\varepsilon_p$ , 如式 (26) 所示. 由于 TSZ410 钢应力-应变曲线无屈服阶段, 因此将传统 D-H 模型进行修改, 去除其屈服平台, 如式 (27) 所示. 拟合不同腐蚀时间下的参数  $n$ 、 $m_1$  和  $m_2$  列于表 9, 并建立这些参数与  $t$  的关系, 如式 (28) 和 (29) 所示, 在此基础上即可构建 TSZ410 钢腐蚀后的本构模型.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (26)$$

式中  $n$  为控制曲线形状的参数.

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_h \\ f_u + (f_y - f_u) \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon}{\varepsilon_u - \varepsilon_h} \right)^{m_1} & \varepsilon_h < \varepsilon \leq \varepsilon_u \\ f_u - (f_u - f_f) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_u}{\varepsilon_f - \varepsilon_u} \right)^{m_2} & \varepsilon_u < \varepsilon \leq \varepsilon_f \end{cases} \quad (27)$$

$$n = 25.64499 + 0.00566t \quad (28)$$

$$\begin{cases} m_1 = 3.50857 - 0.02072t + 2.53443t^2 \\ m_2 = 3.27271 \end{cases} \quad (29)$$

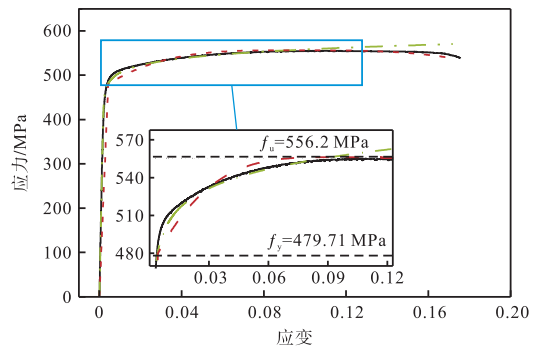
图 19 为 R-O 模型、D-H 模型与试验曲线的对比. 结果显示, R-O 模型和 D-H 模型均与试验曲线吻合较好. 为了定量分析模型的准确性, 将计及腐蚀影响的 R-O 模型、D-H 模型在不同腐蚀天数下, 应力-应

变曲线 1/4、1/2 和 3/4 点处的误差绘于图 20 的上半

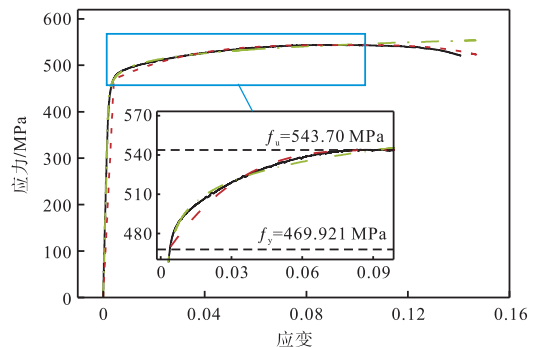
表 9 TSZ410 钢腐蚀后本构模型参数

Tab.9 Parameters of constitutive model of TSZ410 steel after corrosion

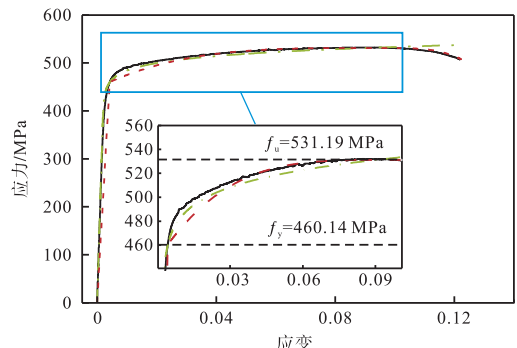
试样	D-H 模型		R-O 模型
	$m_1$	$m_2$	$n$
TSZ410-0	3.86117	4.12437	25.69893
TSZ410-20	2.72846	4.29221	25.68117
TSZ410-40	2.74277	2.17886	25.84340
TSZ410-60	3.43448	1.90413	26.04173
TSZ410-80	4.14256	4.15732	25.99733
TSZ410-100	3.45437	3.88249	26.41374
TSZ410-120	4.72075	2.36960	26.21575



(a) 0 d



(b) 60 d



(c) 120 d

— 试验    - - - R-O模型    ··· D-H模型

图 19 TSZ410 钢试验曲线与本构模型对比

Fig.19 Comparison of TSZ410 steel test curve with constitutive models

部分,可见在考虑腐蚀影响后,R-O 模型与 D-H 模型的误差均小于 2%,但 R-O 模型形式较为简单,故推荐使用.同时,也将不考虑锈蚀影响的 R-O 模型( $n$ 取常数 25.64)和 D-H 模型与试验曲线进行对比见图 20 的下半部分,可发现未腐蚀条件下的 R-O 模型和 D-H 模型与试验曲线的误差也维持在 6%以内.因此,可采用计及腐蚀影响的精细化 R-O 模型高效表征 TSZ410 钢的本构(误差小于 2%).此外,为降低工程应用难度,亦可直接采用不考虑腐蚀影响的本构模型(误差小于 6%).

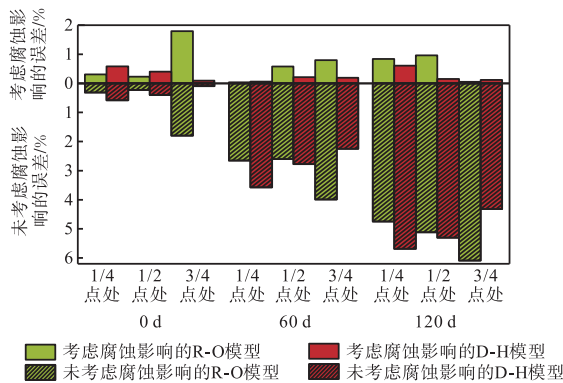


图 20 TSZ410 钢本构模型误差分析

Fig.20 Error analysis of constitutive models of TSZ410 steel

## 5 结 论

本文通过长达 120 d 的中性盐雾腐蚀试验,研究了 TSZ410 钢与 Q420 钢的腐蚀演化特征及力学性能退化规律,并基于 D-H、S-FP 模型和 R-O 模型分别建立了两种钢材腐蚀后的本构模型,主要结论如下.

(1) Q420 钢的锈层成分由初期的  $\alpha$ -FeOOH 和  $Fe_2O_3$  逐渐转化为  $Fe_3O_4$ ,全周期以  $Fe_3O_4$  为主导; TSZ410 钢的锈层由初期疏松的  $MnO(OH)-\alpha$ -FeOOH,经  $Cr_2O_3$  钝化膜溶解,转化为致密的  $MnCr_2O_4-Fe_3O_4$ ,显著提升了 TSZ410 钢的长期耐蚀性.

(2) 建立了两种钢材质量损失率随腐蚀时间的幂函数方程,发现 Q420 钢在腐蚀 80 d 后颈缩现象消失,表现出脆性断裂特征,腐蚀 120 d 的质量损失率高达 13.51%; TSZ410 钢始终能保持明显的颈缩特征,最大质量损失率仅为 1.76%.

(3) 建立了两种钢材强度、应变、弹性模量及断后伸长率等指标与腐蚀天数的线性下降关系式,发现 Q420 钢在 120 d 后的强度降幅约 12%,分别在腐蚀 20 d 和 74 d 后不满足强度和断后伸长率的规范要求; TSZ410 钢的强度降幅始终小于 4.65%,且断后伸长率始终维持在 15% 以上,推荐在塑性变形要求

并不严苛的腐蚀中使用.

(4) 在定量引入腐蚀影响后,推荐 Q420 钢采用 D-H 模型(误差小于 1.53%)及 TSZ410 钢使用 R-O 模型(误差小于 2%)建立锈蚀后钢材的本构关系.为降低工程应用难度,TSZ410 钢亦可直接采用不考虑腐蚀影响的 R-O 模型(误差小于 6%).

## 参考文献:

[1] Shu G P, Yang S, Jin X, et al. Study on the bearing capacity of S600E high-strength stainless steel welded cross-sections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 175: 106386.

[2] 邢 哲, 毋凯冬, 张 颖, 等. 高温下焊接不锈钢轴心受压构件稳定性能研究[J]. 工程力学, 2025, 42(2): 164-172.

Xing Zhe, Wu Kaidong, Zhang Ying, et al. Stability of welded stainless steel axial compressive members at elevated temperatures[J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(2): 164-172 (in Chinese).

[3] 翰 耕, 王 佳. 腐蚀-荷载耦合作用下不锈钢结构性能研究进展[J]. 交通科学与工程, 2025, 41(1): 30-40.

Han Geng, Wang Jia. Research progress on the performance of stainless steel structures under corrosion-load coupling effects[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(1): 30-40 (in Chinese).

[4] Dastgerdi A A, Brenna A, Ormellese M, et al. Experimental design to study the influence of temperature, pH, and chloride concentration on the pitting and crevice corrosion of UNS S30403 stainless steel[J]. Corrosion Science, 2019, 159: 108160.

[5] Zhu P, Cao X Y, Wang W, et al. An investigation on microstructure and pitting corrosion behavior of 316L stainless steel weld joint[J]. Journal of Materials Research, 2017, 32(20): 3904-3911.

[6] 胡丽华, 张玉楠, 常 炜, 等. 2507 双相不锈钢在南海深水环境中的点蚀和缝隙腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(6): 33-37.

Hu Lihua, Zhang Yunan, Chang Wei, et al. Pitting and crevice corrosion behaviors of 2507 duplex stainless steel in deep water environment of the South China Sea[J]. Corrosion & Protection, 2022, 43(6): 33-37 (in Chinese).

- [7] 范 镒, 苏豪展, 陈 凯, 等. 奥氏体不锈钢在海水环境中的腐蚀疲劳裂纹扩展行为[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(7): 67-74.  
Fan Yi, Su Haozhan, Chen Kai, et al. Corrosion fatigue crack growth behavior of austenitic stainless steels in seawater environment[J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(7): 67-74(in Chinese).
- [8] 杨 斌, 陈 吉, 耿 越, 等. 2205 双相不锈钢在水溶液中的疲劳裂纹扩展行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(2): 182-186.  
Yang Bin, Chen Jie, Geng Yue, et al. Fatigue crack propagation behavior of 2205 duplex stainless steel in aqueous medium[J]. Corrosion Science & Protection Technology, 2018, 30(2): 182-186(in Chinese).
- [9] Yuan H X, Han F Y, Theofanous M. Experimental behaviour of hybrid carbon steel-stainless steel bolted connections subjected to electrochemical corrosion[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 199: 111794.
- [10] 班慧勇, 杨凯华, 梅懿潇. 不锈钢复合钢材及其焊接接头耐腐蚀性能试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(2): 111-121.  
Ban Huiyong, Yang Kaihua, Mei Yixiao. Experimental study of corrosion resistance of stainless-clad bimetallic steel and welded connections[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2021, 54(2): 111-121(in Chinese).
- [11] GB/T 228.1—2010 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
GB/T 228.1—2010 Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010(in Chinese).
- [12] GB/T 1591—2018 低合金高强度结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
GB/T 1591—2018 High Strength Low Alloy Structural Steels[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018(in Chinese).
- [13] GB/T 3280—2015 不锈钢冷轧钢板和钢带[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
GB/T 3280—2015 Cold Rolled Steel Plate, Sheet and Strip[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015(in Chinese).
- [14] GB/T 13298—2015 金属显微组织检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
GB/T 13298—2015 Inspection Methods of Microstructure for Metals[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015(in Chinese).
- [15] Guo Q, Zhao Z Z, Lu Y, et al. Corrosion evolution and axial mechanical performance degradation of corroded M24 high-strength bolts[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 213: 108411.
- [16] Kong Z Y, Jin Y, Hossen G M S, et al. Experimental and theoretical study on mechanical properties of mild steel after corrosion[J]. Ocean Engineering, 2022, 246: 110652.
- [17] GB/T 10125—2021 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
GB/T 10125—2021 Corrosion Test in Artificial Atmospheres—Salt Spray Test[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021(in Chinese).
- [18] ASTM G1-03 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2003.
- [19] Guo Q, Wu Z Y, Xing Y, et al. Corrosion evolution and mechanical property deterioration of Q355NH weathering steel in long-term neutral salt spray environment[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134193.
- [20] 林 和, 吴群雄, 朱宇勋, 等. TSZ410 不锈钢焊接接头在盐雾试验中的腐蚀行为[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(9): 701-706.  
Lin He, Wu Qunxiong, Zhu Yuxun, et al. Corrosion behavior of TSZ410 stainless steel welded joint in salt spray test[J]. Electroplating & Finishing, 2021, 40(9): 701-706(in Chinese).
- [21] 刘思维, 罗 强, 王 理. 核级 316NG 控氮奥氏体不锈钢的局部腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(10): 773-776, 788.  
Liu Siwei, Luo Qiang, Wang Li. Localized corrosion behavior of nuclear grade nitrogen-containing austenitic stainless steel 316NG[J]. Corrosion and Protection, 2017, 38(10): 773-776, 788(in Chinese).
- [22] 杨 峰, 赵尚传, 王淞波. 海洋环境下不锈钢耐腐蚀性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2008, 9(4): 169-171.  
Yang Feng, Zhao Shangchuan, Wang Songbo. Study on corrosion resistance of stainless steel bars in marine envi-

- ronment[J]. Highway Traffic Science and Technology(Applied Technology Edition), 2008, 9(4): 169-171 (in Chinese).
- [23] Guo X Y, Kang J F, Zhu J S, et al. Corrosion behavior and mechanical property degradation of weathering steel in marine atmosphere[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(9): 04019181.
- [24] 刘超, 代文贺, 王克俊, 等. Cu 含量对 Q420 钢在货油舱内底板环境下腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(4): 927-938.  
Liu Chao, Dai Wenhe, Wang Kejun, et al. Effect of Cu content on corrosion behavior of Q420 steel in an artificial solution of bottom plate environment of cargo oil tanks[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(4): 927-938 (in Chinese).
- [25] 谭何灵, 周成, 刘希辉, 等. Cr 对 Q420 钢在高盐度大气环境下耐蚀性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(3): 267-272.  
Tan Heling, Zhou Cheng, Liu Xihui, et al. Effect of Cr on corrosion resistance of Q420 steel in atmosphere with high salinity[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(3): 267-272 (in Chinese).
- [26] Dang H Y, Liang A R, Feng R, et al. Experimental study on mechanical properties and low-cycle fatigue behaviour of stainless steels subjected to salt spray and dry/wet cycle[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 165: 107187.
- [27] Nie B, Xu S H, Yu J, et al. Experimental investigation of mechanical properties of corroded cold-formed steels[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162: 105706.
- [28] 石永久, 王萌, 王元清. 结构钢材循环荷载下的本构模型研究[J]. 工程力学, 2012, 29(9): 92-98, 105.  
Shi Yongjiu, Wang Meng, Wang Yuanqing. Study on constitutive model of structural steel under cyclic loading [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 92-98, 105 (in Chinese).

(责任编辑: 武立有)