

文章编号:1007-9629(2023)12-1271-08

海洋大气环境中 Q370qENH 耐候钢的应力腐蚀演化

余玉洁^{1,2,*}, 罗永琪¹, 孙洪斌³, 胡春建¹, 朱志辉^{1,2}

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中南大学 高速铁路建造技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410075; 3. 山东铁路投资控股集团有限公司, 山东 济南 250102)

摘要: 采用周期性干湿交替盐雾加速腐蚀试验来模拟海洋性大气腐蚀环境, 研究了应力作用下 Q370qENH 耐候钢的腐蚀速率、锈层发育与物相组成、锈坑形貌以及损伤拉伸性能。结果表明: 相较于无应力腐蚀, 应力腐蚀显著提升了 Q370qENH 表面的腐蚀活性, 加快了 Q370qENH 的腐蚀, 同时在一定程度上延缓了稳定性锈层的生成, 并进一步削减了 Q370qENH 的强度; 无论是否存在应力, Q370qENH 在盐雾环境中最后均未生成较为稳定的锈层保护层; 在高氯海洋性大气腐蚀环境中, Q370qENH 并未表现出优越的抗腐蚀性能, 不建议免涂装使用; Q370qENH 腐蚀后的各项性能仍处于较高水平。

关键词: 耐候钢; Q370qENH; 应力腐蚀; 锈层形貌; 静力拉伸

中图分类号: U24; TG172.3

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.12.005

Stress Corrosion Evolution of Q370qENH Weathering Steel in Marine Atmosphere Environment

YU Yujie^{1,2,*}, LUO Yongqi¹, SUN Hongbin³, HU Chunjian¹, ZHU Zhihui^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Research Center of High-Speed Railway Construction Technology, Central South University, Changsha 410075, China; 3. Shandong Railway Investment Holding Group Company Limited, Jinan 250102, China)

Abstract: The corrosion resistance of Q370qENH weathering steel was investigated by using periodic dry/wet alternating salt spray accelerated corrosion tests to simulate marine atmospheric corrosion environment. A comprehensive analysis was performed with analyzing the corrosion rate, rust layer development and phase composition, rust pit morphology and damage tensile property, including corrosive mechanism and characterization. The results show that compared with stress free corrosion, the stress corrosion can significantly improve the corrosion activity of Q370qENH's surface, thus speeding up the corrosion rate, delaying the formation of stable rust layer to a certain extent and further reducing Q370qENH's strength. However, no matter whether there is stress or not, the stable protective layer is not formed in the salt spray environment. Q370qENH does not show excellent corrosion resistance in high chloride atmosphere, in which corrosion environment, Q370qENH is not recommended to be used without coating. But Q370qENH still presents a good mechanical properties when with a high level of corrosion.

Key words: weathering steel; Q370qENH; stress corrosion; morphology of rust layer; static tension

耐候钢是一种将普通碳钢降低含碳量, 并添加少量 Cu、P、Cr、Mn 等合金元素形成的低合金结构

收稿日期: 2023-03-31; 修订日期: 2023-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278231); 山东省交通运输行业重点科研项目(2021-MS4-097); 山东省交通运输厅科技计划(2021B103); 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ20073)

第一作者(通讯作者): 余玉洁(1990—), 女, 江西南昌人, 中南大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: yuji@csu.edu.cn

钢^[1].在腐蚀环境下,耐候钢可以在构件表面快速形成致密的锈层,阻碍锈蚀的进一步发展,保护内部的钢材基体^[2-3].中国近年来不断推广耐候钢在桥梁工程中的应用,跨连霍高速公路主线桥、蓼子特大桥等公路桥梁已率先使用耐候钢.铁路桥梁也在逐步推进,西南地区藏木桥使用了免涂装的Q345qENH和Q420qENH耐候钢^[4-5],山东潍莱高铁应用耐候钢分别建成了国内首座全焊接和全栓接的大跨度免涂装耐候钢梁桥^[6]等.

国内外学者已经对耐候钢腐蚀后的性能展开了一定研究.Guo等^[7]指出腐蚀会降低耐候钢的屈服强度.宗亮等^[8]通过加速腐蚀试验发现Q355NHD在海洋大气环境中未表现出良好的耐腐蚀性能,但力学性能仍处于较高水平.Morcillo等^[1]和Xu等^[9]研究发现,耐候钢在温和大气环境中表现良好,在海洋大气或盐雾环境中由于氯离子浓度较高,可能导致腐蚀速率显著增加.张素梅等^[10]通过通电加速腐蚀试验,发现应力状态可加快钢材的腐蚀速率.郭晓宇^[11]发现在应力腐蚀状态下耐候钢力学性能的退化更为严重.

虽然目前针对耐候钢的腐蚀已有部分研究,但其

复杂环境下的腐蚀演化和损伤效应等方面认识还不完善,并且大部分研究主要针对Q235NH、Q355NH等钢种,鲜有有关于Q370qENH的报道,尤其是针对实际耐候钢结构带应力状态腐蚀演化方面的研究较少.开展耐候钢在应力和腐蚀环境耦合作用下的耐腐蚀性能研究,有助于更真实地认识和评估实际结构中钢材的性能劣化状态,具有重要的实际工程应用价值.

本文以桥梁用耐候钢Q370qENH为研究对象,开展模拟高氯海洋性大气复杂环境下的加速腐蚀试验,探索Q370qENH的耐候性能、锈层发育规律以及腐蚀损伤钢材的拉伸性能,研究有无应力腐蚀情况下耐候钢的各类物理化学指标和腐蚀特征,为今后耐候钢在复杂腐蚀环境中的实际应用提供试验经验和参考.

1 试验

1.1 材料及前处理

试验选用山东汉鼎钢铁生产的桥梁用耐候钢Q370qENH,其化学组成(质量分数)见表1.其中,CEV为碳当量.

表1 Q370qENH的化学组成
Table 1 Chemical composition of Q370qENH

															w/%
C	Si	Mn	P	S	Als	Ni	Cr	Cu	CEV	V	Ti	Nb	Mo	B	
0.094 0	0.270 0	1.370 0	0.016 0	0.002 0	0.030 0	0.320 0	0.440 0	0.026 0	0.380 0	0.006 6	0.016 0	0.040 0	0.040 0	0.000 2	

根据GB/T228.1—2010《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》和GB 6397—86《金属拉伸试验试样》进行试件设计,并采用线切割制作而成.试件分为矩形试件和标准拉伸试件:矩

形试件用于开展腐蚀速率和腐蚀演化特性测试;标准拉伸试件用于测试腐蚀损伤后试件的残余力学性能.试件尺寸和应力加载方式如图1所示.

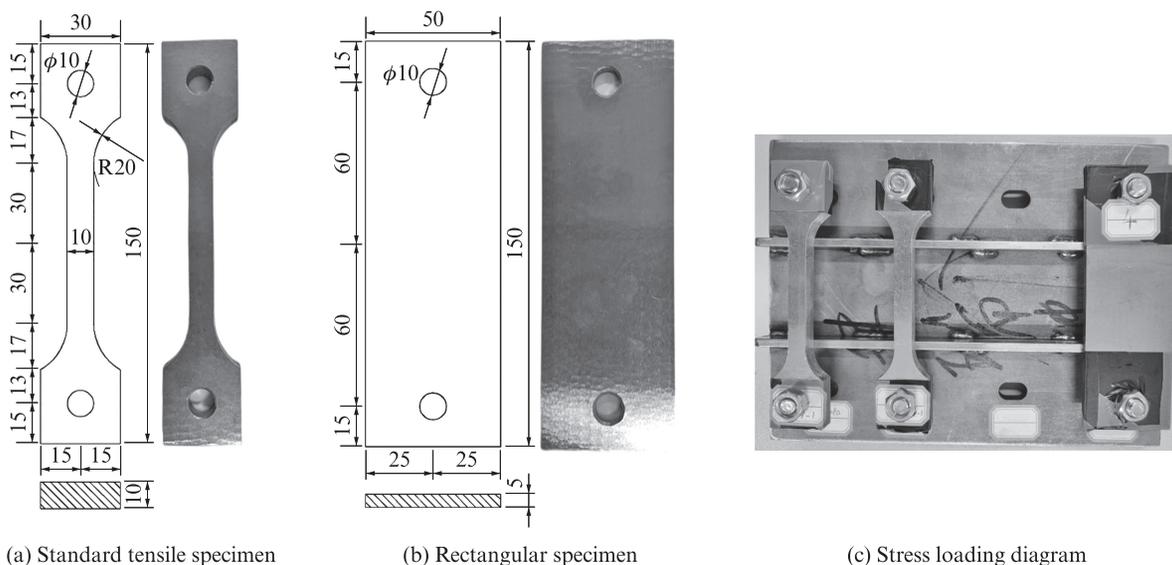


图1 腐蚀试件及应力加载示意图

Fig. 1 Corrosion specimens and stress loading diagram (size: mm)

为实现恒定应力腐蚀状态,设计如图1(c)所示四点弯加载支架.试件两端预设螺栓孔,采用螺栓于试件两端拧紧形成四点弯曲状态,使试件中间区段表面处于均匀恒定的应力状态.将支架与试件整体置于盐雾箱内,即可实现试件在恒定应力状态下的腐蚀.试验共制作了标准拉伸试件28个,矩形试件14个,共42个腐蚀试件,其中有应力和无应力腐蚀试件各21个.在进行试验之前,所有试件保持整洁干净.

试验前,将试件两端夹持段用防腐胶带缠绕,并在试件表面粘贴应变片.结合HBM应变测量仪,通过扭力扳手控制螺栓的拧紧程度.由螺栓中产生的预紧力对试件施加端部压力,保证试件中间为纯弯受力状态,从而实现应力的精准加载.结合桥梁实际运营下的受力情况,取较大应力进行加载,施加应力为试件屈服强度的60%.

1.2 试验方法

试验采用NaCl盐雾环境试验箱来模拟海洋性腐蚀环境,参照GB/T 19746—2018《金属和合金的腐蚀盐溶液周浸试验》和TB/T 2375—1993《铁路用耐候钢周期浸润腐蚀试验方法》,进行周期性干湿交替加速腐蚀试验.以腐蚀循环次数(N)为划分标准,分为5、10、15、30、35、40、45个循环,一共7个腐蚀工况下的加速腐蚀试验.1个循环周期为8 h:2 h盐雾→4 h干燥→2 h湿润,盐雾模式箱内温度(35 ± 2) $^{\circ}\text{C}$,持续喷淋5%(质量分数)NaCl溶液,干燥模式温度(60 ± 2) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度不超过30%,湿润模式温度(50 ± 2) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度不低于95%.每个工况包括2个有应力标准拉伸试件,2个无应力标准拉伸试件,1个有应力矩形试件,1个无应力矩形试件.

1.3 试验结果表征

将腐蚀后的标准拉伸试件进行除锈处理,先用刀片刮取锈层,之后将试件浸于除锈液之中(3.5 g六次甲基四胺+500 mL盐酸(质量分数为37%)+500 mL蒸馏水).除锈过程在常温下进行,除锈时间由试样的腐蚀程度而定,直到锈层全部清除干净,之后用蒸馏水和酒精清洗并风干、称重.利用腐蚀前的质量(m_1)以及腐蚀除锈后的质量(m_2),计算试件的质量损失(Δm):

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (1)$$

腐蚀量(P)为:

$$P = \frac{\Delta m \times 10^6}{S \times D} \quad (2)$$

式中: S 为试件腐蚀的表面积, mm^2 ; D 为试件的密度,

g/cm^3 .

腐蚀速率(R)为:

$$R = \frac{P}{t} \quad (3)$$

式中: t 为腐蚀时间,h.

将上述结果进行拟合^[12]:

$$P = at^b \quad (4)$$

式中: a 、 b 为常数.

对腐蚀后的矩形试件锈层进行宏观和微观分析.选择矩形试件腐蚀段3 cm×3 cm同一区域进行胶黏,以测试锈层黏附的稳定性.将透明胶带粘贴在试件表面,之后用滚轮轻轻碾压,保证胶带和试件表面充分接触,然后将胶带撕下贴在白色纸张上,使用相机拍照.

对不同腐蚀阶段的锈层进行成分分析.在除锈过程中用刀片刮取下的锈层用研钵研磨成均匀的粉末,采用日本理学Smartlab SEX射线衍射仪(XRD)分析锈层的稳定相.试验采用铜靶,电压和电流分别设定为40 kV和40 mA,扫描角度为 $5^{\circ}\sim 90^{\circ}$,扫描速率为 $1(^{\circ})/\text{min}$.

采用SIMSCAN工业级三维扫描仪对除锈后的标准拉伸试件表面进行三维扫描,获取腐蚀后的形貌,采样精度为0.06 mm.

结合耐候钢相关规范,使用MTS微机控制电子万能试验机对除锈后的试件进行腐蚀后静力拉伸试验,获取Q370qENH耐候钢腐蚀后的屈服强度和极限强度退化规律.

2 结果和讨论

2.1 腐蚀失重

试件的腐蚀量及腐蚀速率随时间的变化如图2所示.由图2可见,试件的腐蚀速率呈先增后降的变化趋势,且在应力作用下试件的腐蚀速率始终比无应力作用下的大.试验前期裸露试件表面产生腐蚀反应,且应力作用使钢材基体出现许多微小裂缝,增大了基体与空气的接触面积,提升了钢材的腐蚀活性,进而增大了腐蚀速率.随着腐蚀程度的逐步加深,锈层逐渐覆盖整个试件,对钢材基体起到了一定的保护作用,腐蚀速率逐渐减小,应力和无应力工况之间的差距也逐渐减小.

2.2 锈层形貌

图3为锈层的发育形貌,中间2列分别为有、无应力作用下矩形试件腐蚀区段的锈层形貌,外围2列为放大100倍后的锈层形态.由图3可见:整个腐蚀过程由点蚀开始,逐渐过渡为均匀的大面积腐蚀,当

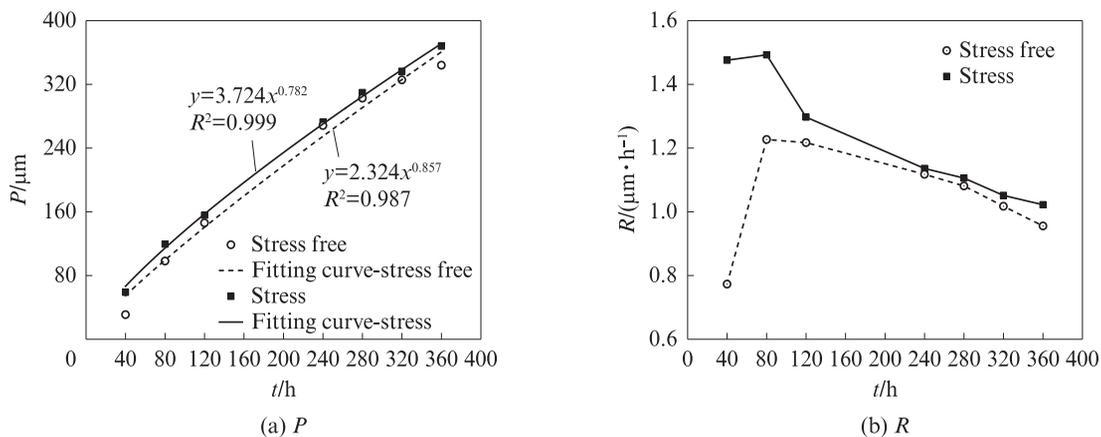


图2 试件腐蚀量及腐蚀速率随腐蚀时间的变化

Fig. 2 Change of corrosion amount and corrosion rate of samples with corrosion time

腐蚀超过15个循环时,锈层基本覆盖钢材表面;锈层随着腐蚀时间的增加而逐渐分为2层,外部锈层疏松脆弱,颜色由浅黄色向深黄色逐渐过渡,内部锈层呈

现深黑色,前期绵软致密,呈细颗粒状,后期厚实坚硬;前期内外锈层分界不明显,当腐蚀超过30个循环时,外部锈层变得容易脱落,内外锈层分离.

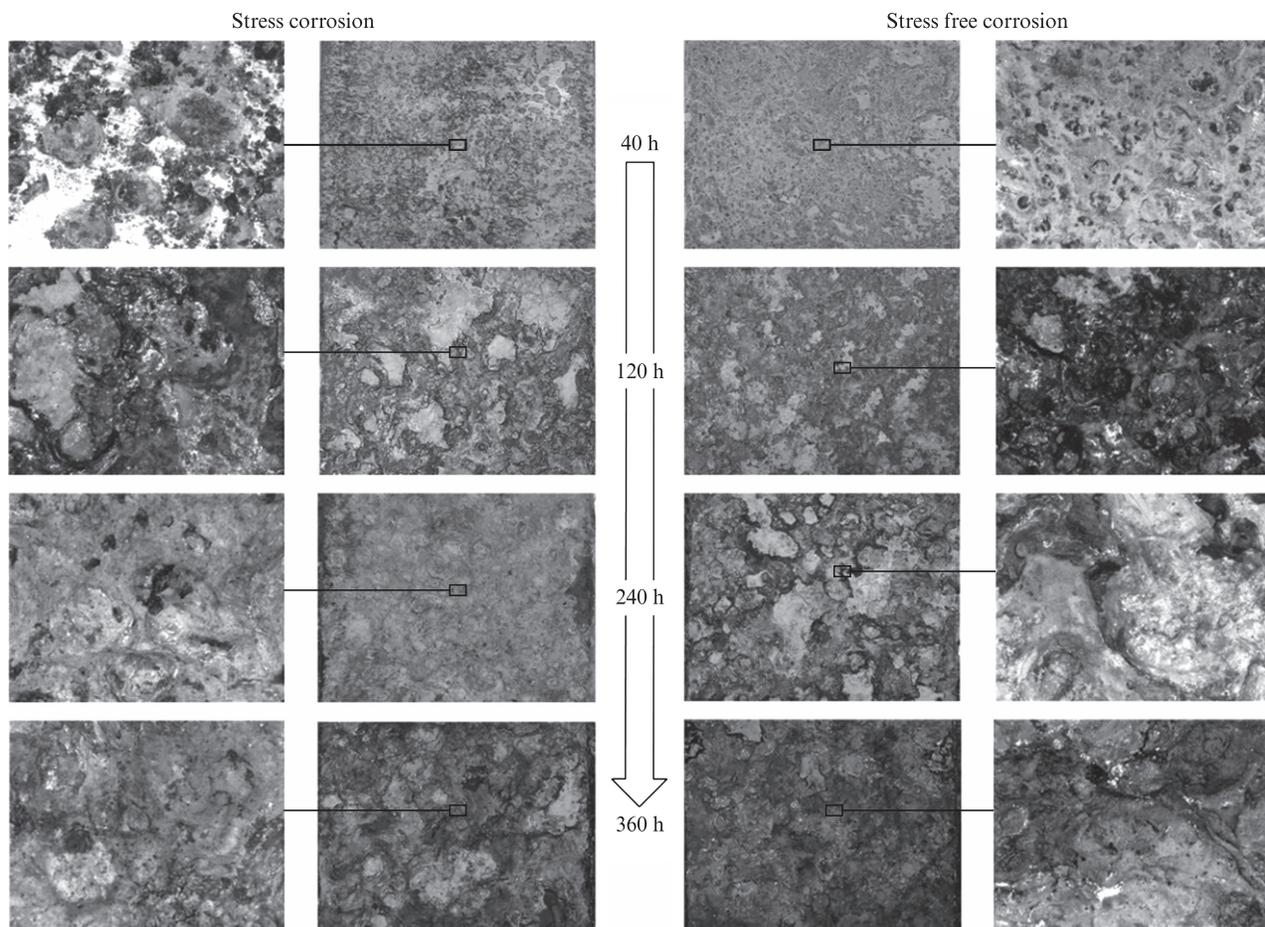
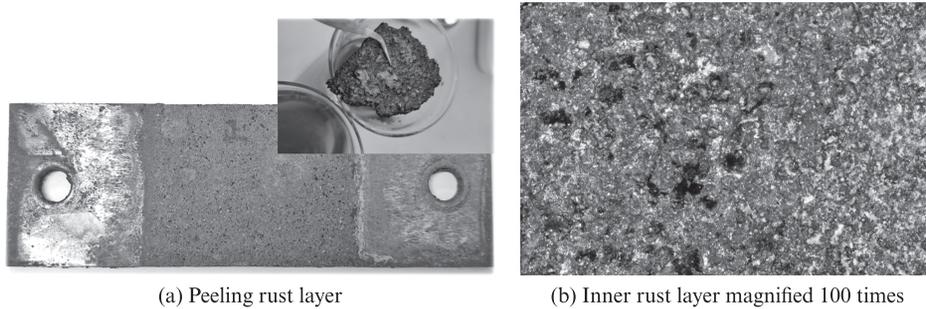


图3 锈层的发育情况

Fig. 3 Development of rust layer

图4为应力作用下经历35个腐蚀循环后锈层的剥落.由图4可见,内锈层变得多孔但不疏松,说明外锈层的脱落降低了对钢材的保护作用,内锈层逐渐

受到腐蚀.在盐雾腐蚀过程中,耐候钢产生的锈层对钢材有一定的抗腐蚀作用,但不易产生稳定的保护锈层.



(a) Peeling rust layer (b) Inner rust layer magnified 100 times

图4 应力作用下经历35个腐蚀循环后锈层的剥落
Fig. 4 Rust layer peeled off after 35 stress corrosion cycles

2.3 锈层的稳定性

图5为锈层的胶黏结果.由图5可见:

(1)随着腐蚀时间的增加,黏附下来的锈颗粒减少,说明随着腐蚀的推进,锈层的黏附力更强,并趋于稳定.锈颗粒的尺寸在不断变大,说明虽然整体锈层在变得稳定,但是在高浓度Cl⁻的腐蚀下,耐候钢无法形成黏附性强的保护层,局部锈层容易发生脆性断裂,导致大块脱落.

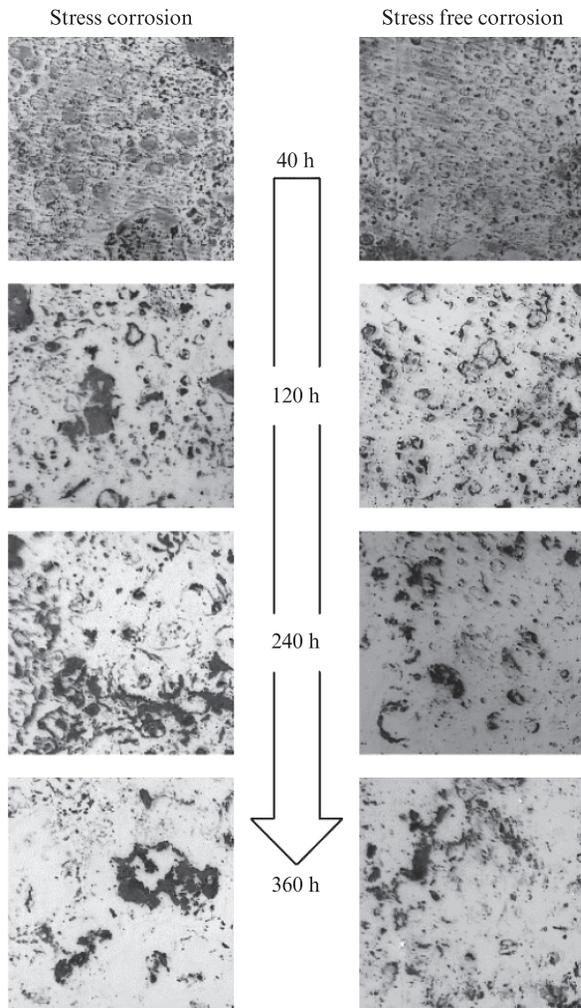
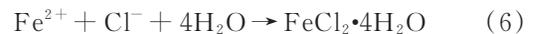


图5 锈层的胶黏测试结果
Fig. 5 Adhesive test result of rust layer

(2)各个腐蚀时间段应力腐蚀试件黏附下来的锈颗粒和大小均比无应力腐蚀工况下的要大,说明应力会延缓稳定锈层的生成.

图6为锈层的XRD图谱.由图6可见,主要腐蚀产物为Fe₃O₄/γ-Fe₂O₃、α-FeOOH、β-FeOOH和γ-FeOOH^[13-14],同时掺杂少量残留的NaCl.

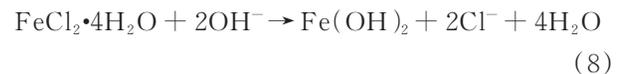
图7为干湿交替腐蚀下钢材的锈蚀流程图^[15-17].在腐蚀环境中,阳极Fe原子在充足水分的作用下失去电子形成Fe²⁺,同时Cl⁻向阳极移动,与不断向外扩散的Fe²⁺发生反应生成FeCl₂:



阴极的O₂与H₂O发生反应得到电子,形成OH⁻:



阳极附近的FeCl₂不断向外扩散,与阴极生成的OH⁻反应生成Fe(OH)₂,同时将Cl⁻释放出来,促使其继续向阳极移动,再次与Fe²⁺结合成FeCl₂,循环反复:



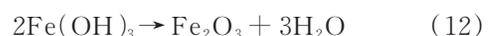
在腐蚀初期,试件裸露在潮湿空气中,阳极的Fe与水直接接触,可以充分反应从而提供大量的Fe²⁺.在与Cl⁻反应后,多余的Fe²⁺易与OH⁻反应生成Fe(OH)₂,因此腐蚀前期会生成大量的Fe(OH)₂:



但是,Fe(OH)₂并不稳定,当水中O₂不足时容易脱水生成Fe₃O₄(黑锈):



当试件表面与空气直接接触时,O₂充足,Fe(OH)₂则可能形成Fe₂O₃(红锈):



同时游离的Fe²⁺会和O₂与H₂O反应,生成各种FeOOH和H⁺.H⁺在湿的腐蚀性气体中发生电化学

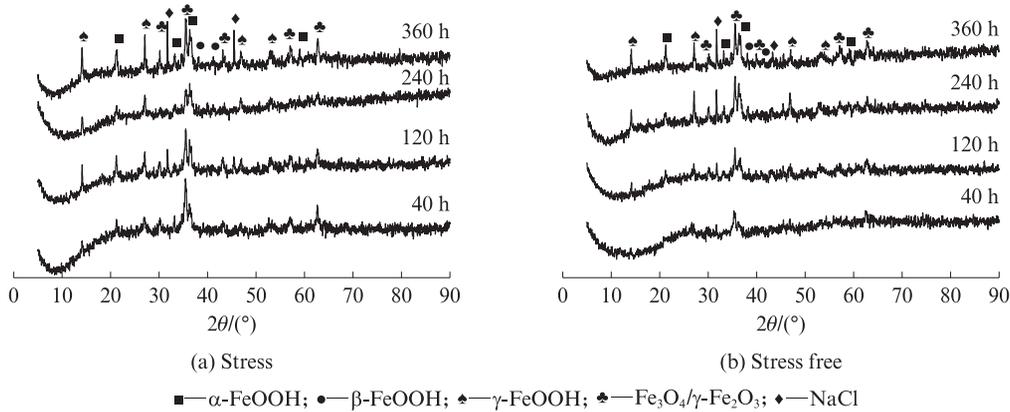


图6 锈层的XRD图谱
Fig. 6 XRD patterns of rust layers

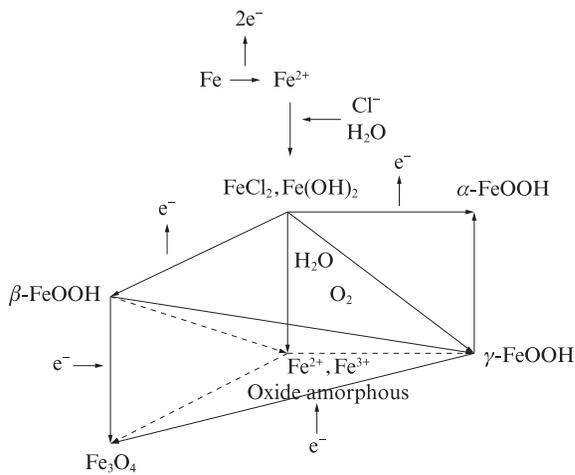
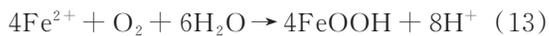


图7 干湿交替腐蚀下钢材的锈蚀流程图
Fig. 7 Rusting flow chart of steel corrosion under dry/wet alternating corrosion

反应生成H原子.当表面锈层并未完全覆盖试件时,H原子会渗透到钢材基体裂缝中,使得钢材晶粒间的原子结合力降低,可能造成钢材的延伸率、断面收缩率降低,强度变小,即氢脆现象:



钢材锈层大部分为非晶,而其余产物中起到主要保护作用的是具有较高致密性和稳定性的 $\alpha\text{-FeOOH}$ ^[18-19]. $\gamma\text{-FeOOH}$ 具有一定的氧化性,可以作为阴极去极化剂参与电化学反应,从而加快腐蚀进程.同时, Fe_3O_4 可作为导体供游离电子通过,促进电化学反应^[20-21].

在相同的测试条件下,XRD图谱的峰值与腐蚀产物含量正相关,即衍射强度峰值越高,对应产物的含量越高^[16,22-23].由图6可以看到,随着腐蚀时间的增长,锈层中 Fe_3O_4 的含量总体趋势在逐渐减少, $\alpha\text{-FeOOH}$ 的含量在不断增加,说明锈层在朝着趋于稳定的方向发展.在有应力状态下,腐蚀早期的 Fe_3O_4 含量居多,后期虽然有增长波动但总体上逐渐

减少,增大的原因来自 $\gamma\text{-FeOOH}$ 的电化学还原^[22].无应力状态下 Fe_3O_4 的含量则呈现先增后减趋势,对照图2腐蚀速率结果可知,早期无应力状态下的腐蚀速率与有应力状态下的差距较大,说明在腐蚀初期,应力极大地促进了腐蚀进程的发生,导致 Fe_3O_4 的含量快速增长,在5个腐蚀循环时就达到已经较高水平.虽然 $\alpha\text{-FeOOH}$ 不断增多,但 $\gamma\text{-FeOOH}$ 的含量也在逐步增加, $\gamma\text{-FeOOH}$ 的生成来自 $\beta\text{-FeOOH}$ 的相变转化.结合前文锈层后期脱落现象以及胶黏结果,可以确定虽然锈层随着腐蚀时间的推进逐渐趋于稳定,但由于不稳定成分同样在增长,无论是否存在应力,在腐蚀试验末期,锈层均没有达到相对稳定的状态.

2.4 除锈后表面形貌

图8为除锈后试件的表面形貌.由图8可见:试件腐蚀由多处点蚀逐渐向面蚀转变,腐蚀程度随着时间的延长而逐渐加深;在腐蚀后期,渐渐形成了不同区域的多个锈坑;应力加载下明显有更强的腐蚀促进作用,这对于长时间承受应力的桥梁钢结构来说存在一定的危害性.

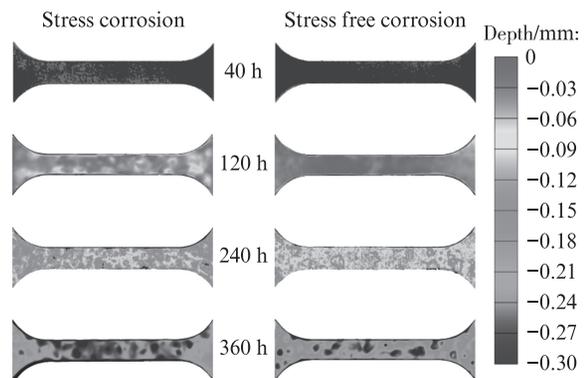
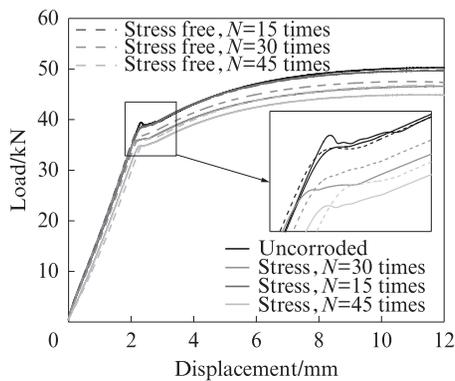


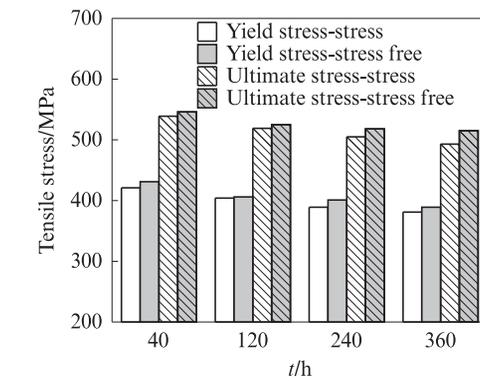
图8 除锈后试件的表面形貌
Fig. 8 Surface morphology of specimens after rust removal

2.5 力学性能分析

图9为试件的静力拉伸结果.由图9可见:随着腐蚀时间的延长,试件的屈服荷载和极限荷载都有一定程度的降低,且有应力组要比无应力组小;相较于试件的初始强度,在经历45个腐蚀循环后有应力和无应力试件的屈服应力分别降低了10.14%和8.25%,极限强度分别降低了8.70%和4.63%,说明应力加快了钢材的腐蚀,使得钢材强度比无应力腐蚀时有所降低;随着腐蚀时间的延长,试件的屈服点更趋模糊,尤其在45个腐蚀循环后,无论有无应力,试件均没有非常明显的屈服点.



(a) Load-displacement curve



(b) Yield stress and ultimate stress vary with corrosion time

图9 试件的静力拉伸结果

Fig.9 Static tensile results of specimens

3 结论

(1)相比于无应力腐蚀,应力腐蚀由于拉应力的存在,增大了钢材的腐蚀活性,从而加深了Q370qENH耐候钢的腐蚀程度,二者在试验早期的腐蚀速率差距较大,后期随着锈层的生成,对钢材基体的保护性逐渐加强,差距逐渐减小.

(2)应力腐蚀在一定程度上延缓了稳定性锈层的生成.虽然随着腐蚀的推进,有无应力状态下Q370qENH的锈层逐渐趋于稳定,但二者在试验后期均未生成稳定性锈层.锈层逐渐分为内外2层,外锈层疏松脆弱,内锈层致密坚硬,并在腐蚀后期出现外锈层剥落现象.

(3)应力通过加重腐蚀程度进一步削减了Q370qENH的强度,在腐蚀一段时间后,由于截面削减和H原子的氢脆现象,Q370qENH的屈服强度和极限强度均有一定程度的下降.在腐蚀后期,Q370qENH力学性能的下降低与蚀坑处的应力集中有直接关系.

(4)在高氯海洋性大气腐蚀环境中,Q370qENH并未表现出优越的耐腐蚀性能,不建议直接免涂装

结合屈服应力的变化以及除锈后试件表面的锈蚀形貌,猜测试件性能下降的原因:一方面因为锈蚀而使得截面积变小,承载能力降低;另一方面由于大面积较深的锈坑存在,造成了较大的局部应力集中,导致钢材提前到达屈服点,并且不会形成明显的屈服现象.同时结合上节锈层的发育机理分析,氢脆现象也是导致试件强度下降的一大原因.但值得注意的是,虽然随着腐蚀进程的推进,钢材强度有所降低,但直到腐蚀末期,Q370qENH耐候钢仍表现出较好的力学强度水平,说明其抗腐蚀能力较高.

使用,应在使用前对耐候钢进行一定时间的预腐蚀,使其先产生稳定的锈层;Q370qENH腐蚀后的性能仍处于较高水平,可以视为一种良好的抗腐蚀钢材.

参考文献:

- [1] MORCILLO M, CHICO B, DÍAZ I, et al. Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review[J]. Corrosion Science, 2013, 77:6-24.
- [2] 王春生,张静雯,段兰,等.长寿命高性能耐候钢桥研究进展与工程应用[J].交通运输工程学报,2020,20(1):1-26.
WANG Chunsheng, ZHANG Jingwen, DUAN Lan, et al. Research progress and engineering application of long life and high performance weathering steel bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(1):1-26. (in Chinese)
- [3] MATSUSHIMA I, ISHIZU Y, UENO T, et al. Effect of structural and environmental factors in the practical use of low-alloy weathering steel[J]. Corrosion Engineering, 1974, 23(4):177-182.
- [4] 程丙贵,韩丽梅,李丽,等.Q500qENH耐候桥梁钢锈层的稳定化处理及形成过程[J].机械工程材料,2022,46(11):38-42,65.
CHENG Binggui, HAN Limei, LI Li, et al. Stabilization

- treatment and forming process of Q500qENH weathering bridge steel rust layer[J]. *Mechanical Engineering Materials*, 2022, 46(11):38-42, 65. (in Chinese)
- [5] 朱劲松,郭晓宇,亢景付,等. 耐候桥梁钢腐蚀力学行为研究及其应用进展[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(5):1-16.
ZHU Jinsong, GUO Xiaoyu, KANG Jingfu, et al. Research on corrosion mechanical behavior of weather-resistant bridge steel and its application progress[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(5):1-16. (in Chinese)
- [6] 孙宗磊,张上. 潍莱铁路跨青荣特大桥全焊接免涂装耐候钢桁梁设计[J]. *桥梁建设*, 2021, 51(1):109-114.
SUN Zonglei, ZHANG Shang. Design of all-welded non-coating weathering steel girder girder of Weilai railway across Qingrong bridge[J]. *Bridge Construction*, 2021, 51(1):109-114. (in Chinese)
- [7] GUO X Y, ZHU J S, KANG J F, et al. Rust layer adhesion capability and corrosion behavior of weathering steel under tension during initial stages of simulated marine atmospheric corrosion[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234:117393.
- [8] 宗亮,张居正,赵博,等. 工业海洋大气环境下焊接耐候钢 Q355NHD 腐蚀后力学性能研究[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(6):168-179.
ZONG Liang, ZHANG Juzheng, ZHAO Bo, et al. Study on mechanical properties of welded weathering steel Q355NHD after corrosion in industrial marine atmosphere[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(6):168-179. (in Chinese)
- [9] XU C, JIN W L, WANG H L, et al. Organic corrosion inhibitor of triethylenetetramine into chloride contamination concrete by eletro-injection method[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 115:602-617.
- [10] 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(1):55-64.
ZHANG Sumei, CHEN Guangrui, LI Aidong, et al. Experimental study on stress corrosion characteristics of Q420qD steel[J]. *Journal of Building Science and Engineering*, 2022, 39(1):55-64. (in Chinese)
- [11] 郭晓宇. 耐候钢-UHPC 华夫板组合梁抗弯性能及其设计方法研究[D]. 天津:天津大学,2019.
GUO Xiaoyu. Research on flexural performance and design method of composite beam with weathering steel-UHPC waffle plate[D]. Tianjin:Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [12] ISHIHARA S, NAN Z Y, MCEVILY A J, et al. On the initiation and growth behavior of corrosion pits during corrosion fatigue process of industrial pure aluminum [J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(9):1659-1668.
- [13] 徐亦冬,陈坚,方建柯,等. 钢筋锈蚀产物纳米压痕的分子动力学模拟[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(6):1410-1415.
XU Yidong, CHEN Jian, FANG Jianke, et al. Molecular dynamics simulation of nanoindentation of steel corrosion products [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(6):1410-1415. (in Chinese)
- [14] 鲁进亮,张俊喜,张羿,等. 钢筋表面氧化层的阴极极化还原过程分析[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(5):770-776.
LU Jinliang, ZHANG Junxi, ZHANG Yi, et al. Analysis of cathodic polarization reduction process of oxidized layer on reinforcement surface[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(5):770-776. (in Chinese)
- [15] PRIYA R, MALLIKA C, MUDALI U K. Corrosion behavior of sensitized 304 SS in nitric acid medium containing oxidizing ions [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2014, 67:459-467.
- [16] 董杰,董俊华,韩恩厚,等. 低碳钢带锈电极的腐蚀行为[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2006, 18(6):414-417.
DONG Jie, DONG Junhua, HAN Enhou, et al. Corrosion behavior of low carbon steel with rust electrode[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2006, 18(6):414-417. (in Chinese)
- [17] 乔宏霞,温少勇,王鹏辉,等. 氯氧镁钢筋混凝土中涂层钢筋腐蚀的电化学特性[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(6):999-1006.
QIAO Hongxia, WEN Shaoyong, WANG Penghui, et al. Electrochemical properties of coated steel bar corrosion in magnesium-oxychloride reinforced concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(6):999-1006. (in Chinese)
- [18] 李晓珍,柳俊哲,闫加利,等. 碳化与氯盐对混凝土孔溶液中钢筋钝化的影响[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(1):224-229.
LI Xiaozhen, LIU Junzhe, YAN Jiali, et al. Effect of carbonation and chloride salts on the passivation of steel bar in concrete hole solution[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(1):224-229. (in Chinese)
- [19] 庄宁,夏浩瑜,董洪汉,等. 海洋环境中CFRP钢管混凝土复合桩基腐蚀试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(12):1262-1268.
ZHUANG Ning, XIA Haoyu, DONG Honghan, et al. Corrosion test study of concrete filled cfrp steel tube pile foundations in marine environment[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(12):1262-1268. (in Chinese)
- [20] ALMEIDA E, MORCILLO M, ROSALES B. Atmospheric corrosion of mild steel. Part II -Marine atmospheres[J]. *Materials and Corrosion*, 2000, 51(12):865-874.
- [21] DILLMANN P, MAZAUDIER F, HÉRLÉ S. Advances in understanding atmospheric corrosion of iron. I. Rust characterisation of ancient ferrous artefacts exposed to indoor atmospheric corrosion[J]. *Corrosion Science*, 2004, 46(6):1401-1429.
- [22] SUZUKI I, MASUKO N, HISAMATSU Y. Electrochemical properties of iron rust[J]. *Corrosion Science*, 1979, 19(7):521-535.
- [23] 董俊华,柯伟. 低碳钢大气腐蚀室内模拟加速腐蚀试验与锈蚀规律[J]. *电化学*, 2009, 15(2):170-178.
DONG Junhua, KE Wei. Simulated accelerated corrosion test and corrosion law of low carbon steel in atmospheric corrosion laboratory[J]. *Electrochemistry*, 2009, 15(2):170-178. (in Chinese)