

Q235B 钢和含 Cr 耐候钢在文昌海洋大气 暴露的锈层特征与耐蚀性

宋玉^{1,2}, 陈小平², 王向东², 黄涛², 陈钰鑫²

(1.华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310012; 2.钢铁研究总院, 北京 100081)

摘要: 采用腐蚀失重法、扫描电镜(SEM)、X射线衍射(XRD)、电子探针(EMPA)等技术研究了暴露在文昌海洋大气环境中的 Q235B 钢和 3Cr 钢的锈层特征和耐蚀性。结果表明: Q235B 钢的腐蚀深度大于 3Cr 钢的; 随暴露时间的延长, 两种钢的腐蚀深度均增大, 大气暴露时间为 1.5 a 时, 3Cr 钢的相对腐蚀率明显下降。Q235B 钢锈层存在较多裂纹, 3Cr 钢锈层致密, 耐蚀性好。Q235B 钢中 Cl 元素的富集降低了材料的耐蚀性, 而 3Cr 钢中合金元素 Cr 富集在内锈层, Cl 元素基本被阻滞在外锈层, 提高了耐蚀性。

关键词: 含 Cr 耐候钢; 文昌海洋大气; 锈层特征; 耐蚀性

中图分类号: TG172.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2019)09-0638-06

Rust Characteristics and Corrosion Resistance of Q235B steel and Cr-Bearing Weathering Steel in Wenchang Marine Atmosphere

SONG Yu^{1,2}, CHEN Xiaoping², WANG Xiangdong², HUANG Tao², CHEN Yuxin²

(1. Huadian Electric Power Institute Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;

2. Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The rust layer characteristics and corrosion resistance of Q235B steel and 3Cr steel exposed to Wenchang marine atmosphere were studied by techniques such as corrosion weight loss method, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and electron micro probe (EMPA). The results show that the corrosion depth of Q235B steel was greater than that of 3Cr steel. The corrosion depth of both steels increased with the extension of exposure time. When the atmospheric exposure time was 1.5 a, the relative corrosion rate of 3Cr steel decreased obviously. There were many cracks in the rust layer of Q235B steel, and the rust layer of 3Cr steel was dense and had good corrosion resistance. The enrichment of Cl in Q235B steel reduced the corrosion resistance of the material, while the alloying element Cr in 3Cr steel was enriched in the inner rust layer, and the Cl element was basically blocked in the outer rust layer, which improved the corrosion resistance of the material.

Key words: Cr-bearing weathering steel; Wenchang marine atmosphere; rust layer characteristic; corrosion resistance

耐候钢作为一种良好的耐大气腐蚀低合金钢, 已被广泛应用于铁路、桥梁、铁塔等领域。耐候钢的耐蚀性主要是由于在钢中添加了 Cu、P、Cr、Ni 等合金元素, 在腐蚀过程中钢铁基体表面会形成致密、连续的锈层, 阻止大气中的氧和水向钢铁基体渗入, 起到减缓腐蚀的作用^[1-2]。对于耐候钢在大气中的腐蚀行为, 目前研究较多的是其在工业大气、海洋大气

条件下的^[3-5], 与碳钢相比, 耐候钢在工业大气环境中具有优良的抗大气腐蚀能力, 但其在严酷海洋大气环境中耐蚀性的相关研究则鲜见报道。众所周知, 海南文昌具有典型的高温、高湿、高盐雾海洋大气环境特点, 且经常受到台风等自然灾害的侵袭, 环境十分恶劣, 目前已建设了相关大气试验站, 因此, 在此地进行严酷环境中钢铁材料腐蚀研究十分必要。

Cr 是能显著提高耐候钢耐蚀性的元素之一。研究表明^[6-7], 随着钢中 Cr 含量的增加, 耐候钢的耐蚀性提高, 这主要是因为 Cr 能够促进保护性锈层的形成, 开路电位正移能够提高基体的钝化能力。也有研究认为^[8], Cr 能部分取代铁锈中的 Fe 而形成

收稿日期: 2018-08-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2014 CB643300)

通信作者: 黄涛(1988—), 博士, 工程师, 从事金属材料腐蚀与防护相关研究, 010-62182770, jxgahuangtao@126.com

α -Fe_{1-x}Cr_xOOH,Cr³⁺ 并不是简单地取代 Fe³⁺,而是位于针状矿 FeO₃(OH)₃ 八面体网格中双链的空位上,使 α -FeOOH 锈层具有阳离子选择性并且堆积较为密集,从而阻止了 Cl⁻ 向基体表面侵蚀,使锈层具有保护作用。但是,SCHWITTER 等^[9]的研究发现,当环境中 Cl⁻ 质量浓度高于 5 mg/(m²·d) 时,Cr 在腐蚀后期加速了耐候钢的腐蚀,这主要是由于 Cr³⁺ 发生了水解反应,降低了基体界面的 pH,从而加速腐蚀。因此,对比研究碳钢和耐候钢在高温、高湿、高盐雾严酷海洋大气环境中的腐蚀行为,探究合金元素 Cr 的抗大气腐蚀机理,对于开发南海地区用耐候钢具有重要的实践指导意义和科学价值。

本工作针对文昌地区特定的严酷自然环境条件,对比研究了 Q235B(碳)钢和 3Cr 耐候钢暴露在高湿热海洋大气环境中的锈层特征和耐蚀性,并对含 Cr 耐候钢的耐蚀机理进行了探究。

1 试验

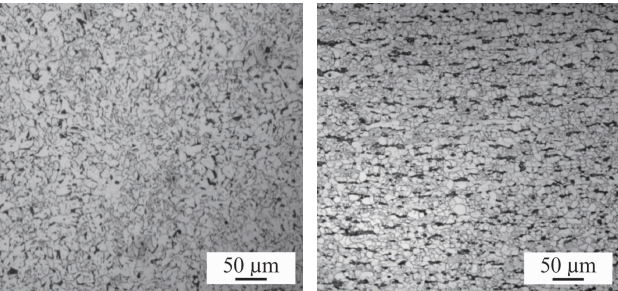
1.1 试验材料

试验材料为 Cr 的质量分数为 3% 的耐候钢(记为 3Cr 钢),对比钢为 Q235B 钢,其化学成分如表 1 所示。试验钢的金相组织见图 1,由图 1 可见,其组织均主要为铁素体+珠光体。

表 1 试验材料的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of test materials %

试样	w _C	w _{Si}	w _{Mn}	w _P	w _S	w _{Cr}	w _{Cu}	w _{Mo}	w _{Al}	w _{Ni}	w _{Sn+ Sb+ RE}
Q235B 钢	0.17	0.14	0.42	0.019	0.015	0.16	—	—	—	—	—
3Cr 钢	0.02	0.40	0.60	0.005	0.002	3.19	0.5	0.39	0.80	0.50	<0.40



(a) Q235B 钢 (b) 3Cr 钢

图 1 试验钢的金相显微组织

Fig. 1 Microstructure of experimental steels:

(a) Q235B steel; (b) 3Cr steel

1.2 试验方法

(1) 大气暴露试验

大气暴露地点为海南文昌大气试验站,文昌的

主要气候参数特征见表 2^[10]。该地区最大的气候特征是:高温、高湿、高盐雾,污染物很少。按照 GB/T 14165—2008《金属和合金大气腐蚀试验现场试验的一般要求》进行大气暴露试验。试验前将金属材料进行切割、铣边、打磨、打孔(编号)、除污、除油并干燥。大气暴露试验用试样尺寸为 150 mm×75 mm×(5~8)mm,暴露试样正面朝南,与地面成 45°进行暴晒。每组 4 片平行样,其中 3 片试样用于失重分析,1 片试样用于观察材料的宏观、微观形貌并分析腐蚀产物。暴露试验周期为 0.5 a 和 1.5 a。试验结束后,按式(1)计算腐蚀深度。

$$d = \Delta m / \rho S \tag{1}$$

式中: Δm 为腐蚀失重, ρ 为试样的密度, S 为腐蚀面积, d 为腐蚀深度。

表 2 文昌地区的主要气候特征参数

Tab. 2 Main climatic characteristic parameters in Wenchang

年平均气温/°C	年相对湿度/%	年日照时间/h	Cl ⁻ 沉积率/(mg·dm ⁻² ·d ⁻¹)	年降水量/mm	SO ₂ 含量/(mg·dm ⁻² ·d ⁻¹)
24.1	86.4	1 803.6	0.54	1 833.6	<0.076

(2) 锈层分析

从暴露试样上截取尺寸为 20 mm×20 mm 的小试样用于锈层表面及截面观察。用于锈层截面观察的试样采用环氧树脂加固剂将其在室温下镶嵌,固化后的试样用砂纸磨至 1 000 号,再进行抛光吹干。采用 HITACHI-4300 型冷场发射扫描电镜(SEM)对带锈试样表面锈层及经环氧树脂镶嵌后的锈层截面进行观察。用于观察锈层截面中元素分布情况的电子探针仪器型号为 JEOL JXA-8230,配置加速电压 20 kV,发射电流 1×10⁻⁸ A,光斑直径 1 μm。从暴露试样表面刮取锈层,研磨成粉末,然后采用 BRUKER D8 X 射线衍射仪(XRD)对锈层物相进行分析。XRD 测试参数设置如下:辐射源为 Co 靶,管电压 40 kV,管电流 30 mA,扫描 2θ 角为 10°~100°,扫描步长 0.02 (°)/s。

2 结果与讨论

2.1 腐蚀速率

由表 3 可见:经相同时间大气暴露试验后,Q235B 钢的腐蚀深度大于 3Cr 钢的;随试验时间的延长,两种试样的腐蚀深度均增加,且 Q235B 钢的腐蚀深度增加更明显;大气暴露 1.5 a 时,Q235B 钢

的腐蚀深度是 3Cr 钢的 2.4 倍。为便于比较,以 Q235B 钢的腐蚀深度为参照,定义相对腐蚀率 r , 见式(2)。由表 3 还可见,经过 1.5 a 大气暴露试验后, 3Cr 钢的相对腐蚀率明显下降,仅为 Q235B 钢的 42%,这说明在文昌大气环境中,含 Cr 钢具有优异的耐蚀性。

$$r = d_{3Cr钢} / d_{Q235B钢} \tag{2}$$

式中: $d_{3Cr钢}$ 和 $d_{Q235B钢}$ 分别为 3Cr 钢和 Q235B 钢的腐蚀深度。

表 3 Q235B 钢和 3Cr 钢在文昌海洋大气环境中暴露不同时间后的腐蚀数据

Tab. 3 Corrosion data of Q235B steel and 3Cr steel after exposure to Wenchang marine atmosphere environment for different times

试样	大气暴露时间/a	腐蚀深度/mm	相对腐蚀率/%
Q235B 钢	0.5	0.042 2	—
	1.5	0.035 2	—
3Cr 钢	0.5	0.084 4	60
	1.5	0.025 3	42

2.2 腐蚀形貌

由图 2 可见:经过 0.5 a 大气暴露试验后,两种试样表面锈层均匀,没有出现脱落,但是两者锈层颜色有差别,Q235B 钢的锈层呈红棕色,3Cr 钢的锈层呈棕褐色;暴露 1.5 a 时,两种钢锈层的颜色差别不大,但 Q235B 钢锈层有明显脱落,而 3Cr 钢表面锈层依然完整均匀,锈层颜色加深,锈层也变得更致密。由图 3 可见:在文昌大气环境中暴露 0.5 a 后,Q235B 钢表面锈层的结构疏松不致密,锈层中出现了大量的裂纹;而 3Cr 钢表面锈层较为致密,尤其是内锈层。由于经过 1.5 a 文昌大气环境暴露试验后,Q235B 钢表面的外锈层基本脱落,因而没有观察其锈层截面形貌,只是对表面形貌(实际上是内锈层形貌)进行扫描电镜观察,见图 4。由图 4 可见:Q235B 钢表面有微裂纹存在,而 3Cr 钢表面锈层平整光滑,锈层颗粒堆积紧密,几乎无微裂纹。

2.3 锈层物相

由图 5 可见:暴露初期(0.5 a),两种钢的腐蚀产物相同,主要为 Fe_3O_4 、 γ -FeOOH、 α -FeOOH,与文献报道的一致^[11-12];暴露 1.5 a 后,在腐蚀产物中还检测到了 β -FeOOH 的峰,但是含量非常少。由此可见,随着暴露时间的延长,两种钢的腐蚀产物类型基本相

同,腐蚀后期锈层中开始出现对锈层耐蚀性不利的 β -FeOOH 物相。 γ -FeOOH 和 α -FeOOH 是锈层中主要的物相, γ -FeOOH 是腐蚀的初始产物,也是一种活性物相,可进一步转化为 α -FeOOH; α -FeOOH 是比 γ -FeOOH 更稳定的物相,被认为是具有保护作用的锈层组织。锈层中的 β -FeOOH 是一种含 Cl^- 的物相结构,通常由 β - $Fe_2(OH)_3Cl$ 转化而来,当 β -FeOOH

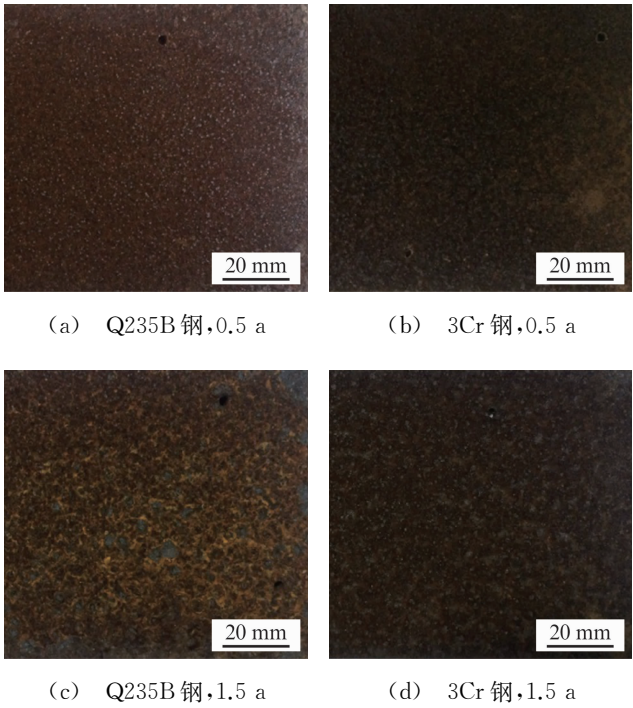


图 2 Q235B 钢和 3Cr 钢在文昌海洋大气环境中暴露不同时间后的表面宏观形貌
Fig. 2 Surface macro morphology of Q235B steel (a, c) and 3Cr steel (b, d) after exposure to Wenchang marine atmosphere for different times

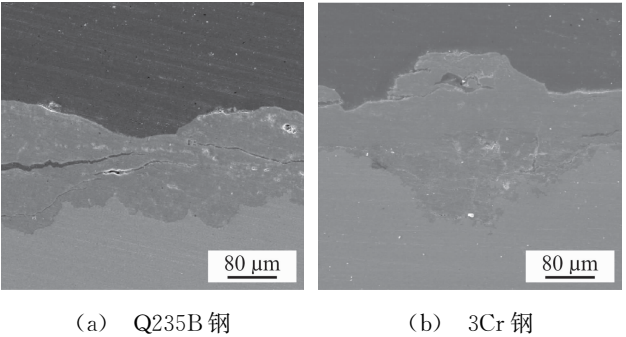


图 3 Q235B 钢和 3Cr 钢在文昌海洋大气环境中暴露 0.5 a 后的锈层截面 SEM 形貌
Fig.3 SEM morphology of rust layer section of Q235B steel (a) and 3Cr steel (b) after exposure to Wenchang marine atmosphere environment for 0.5 years

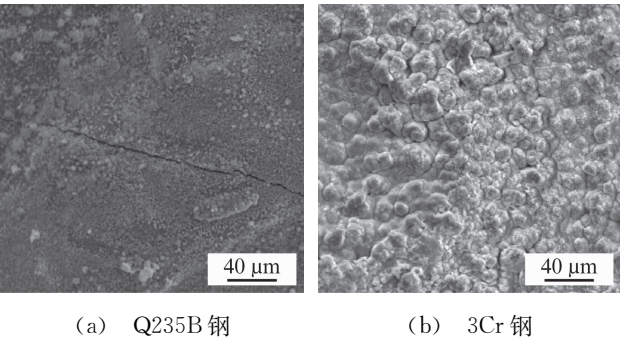


图 4 Q235B 钢和 3Cr 钢在文昌海洋大气环境中暴露 1.5 a 后锈层表面 SEM 形貌

Fig. 4 Surface SEM morphology of rust layer of Q235B steel (a) and 3Cr steel (b) exposed to Wenchang marine atmosphere environment for 1.5 years

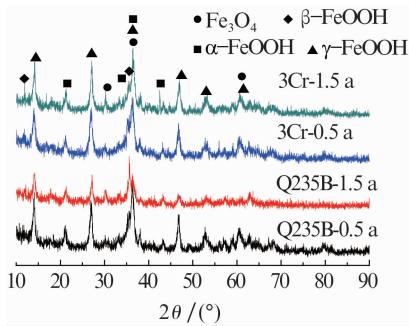


图 5 Q235B 钢和 3Cr 钢在文昌海洋大气环境中暴露不同时间后的锈层 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of rust layer of Q235B steel and 3Cr steel exposed to Wenchang marine atmosphere environment for different times

隧道结构中的 Cl^- 被完全去除时,它可转化为 $\alpha\text{-FeOOH}$ 或 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$,它的形成与大气中盐粒子浓度和暴露时间有关^[13-14]。因而,在这种高温、高湿、高盐雾的海洋大气环境中,腐蚀后期锈层中由于 Cl^- 的渗入,易于形成 $\beta\text{-FeOOH}$,这样,含有大量 Cl^- 的 $\beta\text{-FeOOH}$ 使得锈层疏松,降低了锈层的保护性,不

利于材料的耐蚀性。锈层中的 Fe_3O_4 是良导体,但由于它的热力学稳定性及致密性,被认为是具有保护性的,所以在锈层中是有利的物相^[15]。图 5 的 XRD 图中,3Cr 钢出现较尖锐的 $\alpha\text{-FeOOH}$ 峰,尤其是暴露 1.5 a 时的,这表明锈层中存在较多的 $\alpha\text{-FeOOH}$ 。文献研究表明^[16],含 Cr 耐候钢中的 Cr 能置换 $\alpha\text{-FeOOH}$ 相中的 Fe^{3+} ,形成颗粒极细的纳米级 $\alpha\text{-Fe}_{1-x}\text{Cr}_x\text{OOH}$,该物质性质稳定,对锈层有较强的保护作用。因此,含 Cr 耐候钢的抗大气腐蚀性能更好。

2.4 锈层电子探针分析

由图 6 可见,Q235B 钢的锈层存在较多裂纹与孔洞,Ca 没有出现明显的富集,Si 和 Cl 在锈层中明显富集。这是由于 Q235B 钢中并没有 Cu、Cr 等耐蚀元素,在腐蚀的干/湿交替过程中,其锈层结构较为疏松,导致大气环境中的沙尘等很容易沉积在试样表面,形成低溶性化合物沉积在锈层中,Cl、Si、Ca 这些元素在锈层中富集后又进一步破坏锈层的稳定性。由图 7 可见:Cl 元素主要集中在 3Cr 钢的外锈层,而 Cu、Cr 在内锈层富集,这表明随着钢中合金元素的加入,合金元素会在锈层中富集,结合锈层截面及表面形貌特征可知锈层变得致密,阻滞 Cl^- 渗入的作用增强。由图 8 可见:Q235B 钢内、外锈层中均有 Cl、Ca 元素富集;3Cr 钢中的 Cl 元素几乎只在外锈层富集,Cr 元素在锈层中富集明显。这表明合金元素 Cr 的加入,有利于改善材料的耐蚀性。Cr 在锈层中富集,由于 Cr 在基体和氧化层中的溶解度不同,腐蚀过程中固溶在 Fe 内的 Cr 会在锈层中重新分配。一方面可以细化晶粒,提高锈层的致密程度,抑制阳极过程;另一方面 Cr 的存在会使 $\alpha\text{-FeOOH}$ 锈层具有阳离子选则性,即阻止 Cl^- 向基体表面渗透,从而使锈层具有保护作用^[17-19]。

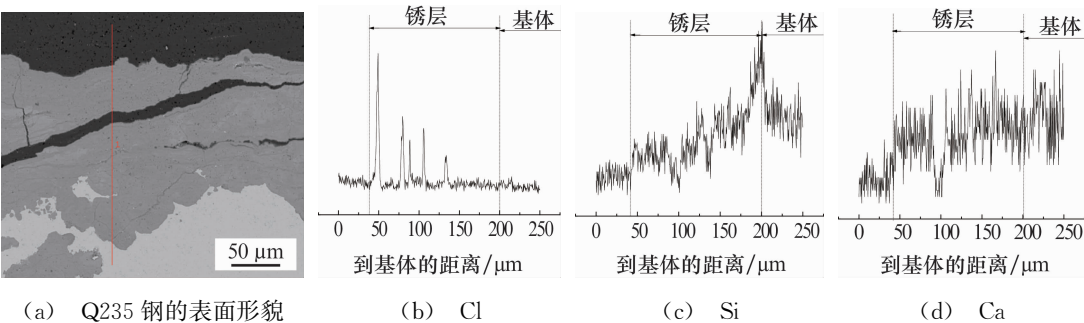


图 6 Q235B 钢在文昌海洋大气环境中暴露 0.5 a 后锈层元素线分布的 EPMA 图谱

Fig. 6 EPMA line profile in the rust of Q235B steel exposed to Wenchang marine atmosphere environment for 0.5 a

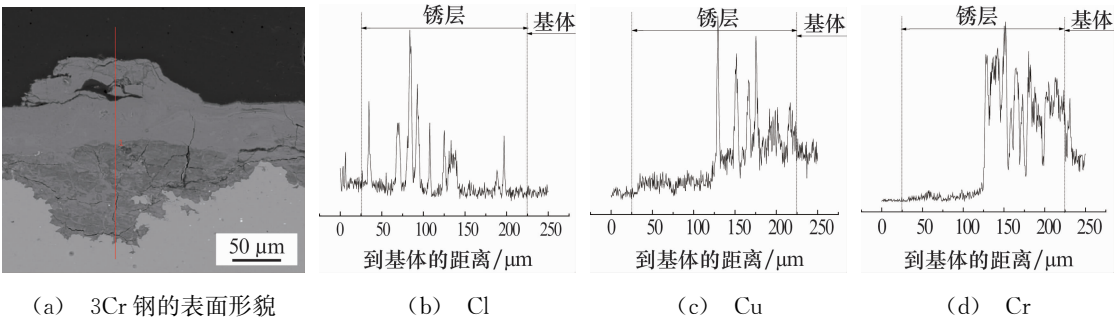


图 7 3Cr 钢在文昌海洋大气环境中暴露 0.5 年后,锈层元素线分布的 EPMA 图谱

Fig. 7 EPMA line profile in the rust of 3Cr steel exposed to Wenchang marine atmosphere environment for 0.5 years

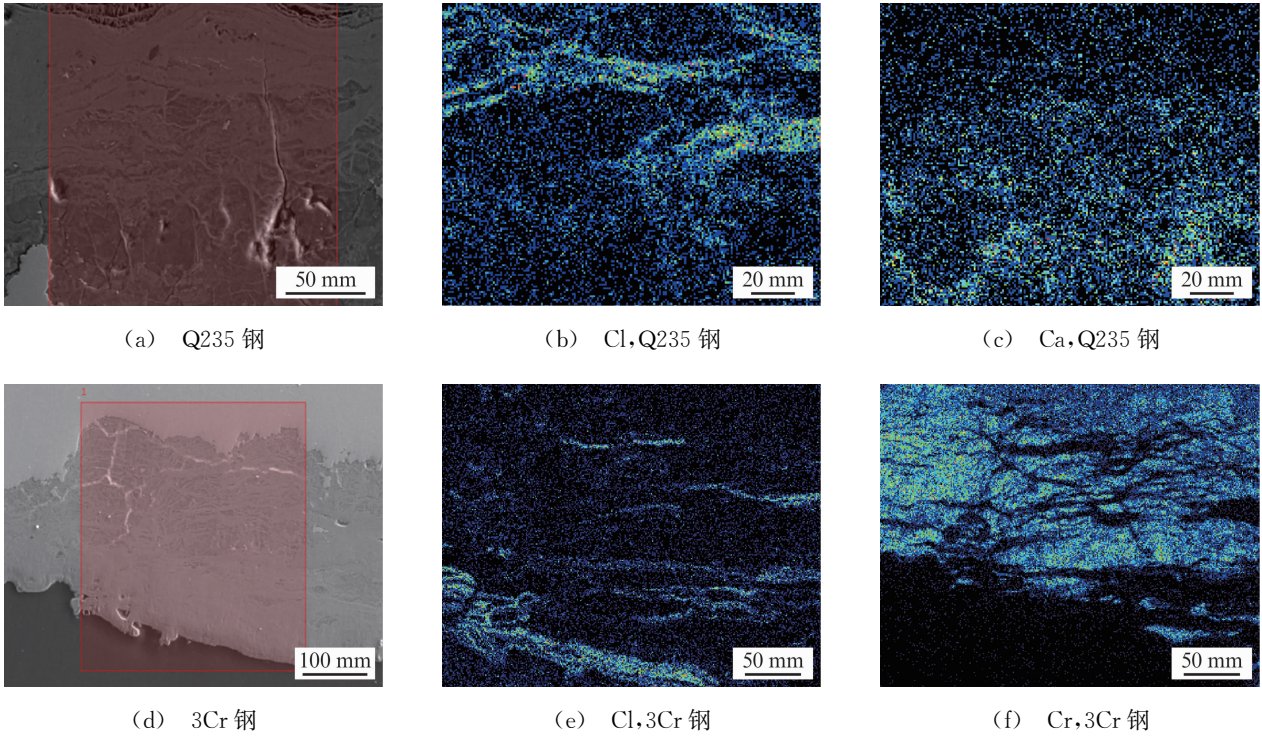


图 8 Q235B 钢和 3Cr 钢在文昌海洋大气暴露 1.5 年后锈层元素面分布的 EPMA 图谱

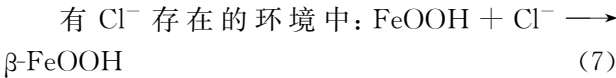
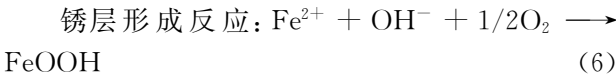
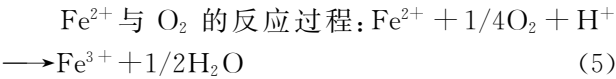
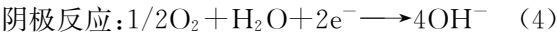
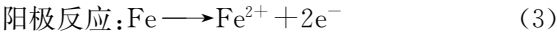
Fig. 8 EPMA mapping of elements in rust of Q235B steel and 3Cr steel exposure to Wenchang marine atmosphere for 1.5 a

2.5 腐蚀机理

海南文昌属于典型的高湿热海洋大气环境,环境中有较高浓度的盐粒子悬浮于大气中,或混于尘埃颗粒中,吸附在其表面。这些带有盐粒子的颗粒会停留、沉积在钢铁材料表面,在高湿热的外部环境中,一旦湿度达到其相对临界湿度,盐粒子很容易发生潮解,释放出 Cl^- 。钢铁材料的表面随着 Cl^- 的不断沉积,在高湿度环境中形成的薄液膜中的 Cl^- 浓度升高。在盐粒子潮解区,氧浓度逐渐降低,大量 Cl^- 渗入到锈层中,由于腐蚀产物的水解效应,将产生强烈的闭塞电池效应,造成蚀孔内 pH 降低,阳极

溶解过程加剧。钢铁材料的大气腐蚀过程,其阴极和阳极反应如式(3)和(4), Fe^{2+} 可以进一步氧化为 Fe^{3+} ,如式(5)。 FeOOH 是初始的腐蚀产物,如式(6),经过一系列的复杂反应过程,可以生成 Fe_3O_4 、 $\gamma\text{-FeOOH}$,并且最终向更稳定的 $\alpha\text{-FeOOH}$ 转变。合金元素 Cr 提高耐蚀性的主要原因如下:首先,Cr 在锈层的转变过程中参与 $\alpha\text{-FeOOH}$ 形成,Cr 元素的添加促进了更多的 $\alpha\text{-FeOOH}$ 形成;其次,Cr 在深色锈层中的富集实际上是在 $\alpha\text{-FeOOH}$ 中的富集,由于 Cr^{3+} 的溶解度低于 Fe^{2+} 的,溶解的 Cr^{3+} 易以氢氧化物的形式在钢表面析出,形成 Cr 富集;同时,Cr 可

置换 $\alpha\text{-FeOOH}$ 中的 Fe^{3+} 形成 $\alpha\text{-Fe}_{1-x}\text{Cr}_x\text{OOH}$,该物质具有阳离子选择透过性,能够阻碍腐蚀性阴离子 Cl^- 的通过,并且能够细化锈层颗粒,因而提高了材料的耐蚀性;此外, Cl^- 还影响 Fe^{3+} 的水解过程,由于 Fe^{3+} 可存在于较低的pH条件下,而在酸性条件下 Cl^- 会加速 Fe^{2+} 向 Fe^{3+} 氧化的过程,因而 Fe^{3+} 的水解作用进一步加速阳极微区pH的降低^[20]。因而,在低的pH条件下,由于 Fe^{3+} 的水解作用,可以形成 $\beta\text{-FeOOH}$ 和 FeCl_n ,如式(7),比Fe的羟基氧化物更不稳定,加剧了腐蚀过程^[19,21]。



3 结论

(1) 在文昌海洋大气环境中,经历不同的暴露时间,Q235B钢的腐蚀深度均大于3Cr钢的;且随暴露周期的延长,两种钢的腐蚀深度均增加,大气暴露1.5 a,3Cr钢的相对腐蚀率是Q235B钢的42%。

(2) 不同暴露时间条件下,3Cr钢和Q235B钢的腐蚀产物类型一致,含量上有所差别:腐蚀初期(0.5 a),均为 Fe_3O_4 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$;腐蚀后期(1.5 a),还检测到少量的 $\beta\text{-FeOOH}$ 。

(3) 在文昌海洋大气环境中, Cl^- 会加速腐蚀过程,影响锈层的结构。Q235B钢锈层疏松,内、外锈层中均有Cl元素富集;含Cr钢锈层致密且Cl元素几乎被阻滞在外锈层,Cr元素在内锈层富集明显,易于形成致密的稳定锈层,提高了材料的耐蚀性。

参考文献:

[1] 柯伟,董俊华.有关耐候钢的那些事儿[J].中国公路,2016(11):29-32.
[2] MORCILLO M, DÍAZ I, CHICO B, et al. Weathering steels: from empirical development to scientific design. A review[J]. Corrosion Science, 2014, 83: 6-31.
[3] 马元泰,李瑛,王福会.热带海洋性环境下CortenA(09CuPCrNi)耐候性研究[J].腐蚀科学与防护技术,2010,22(4):271-277.

[4] 林翠,李晓刚,王光雍.金属材料在污染大气环境中初期腐蚀行为和机理研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2004,16(2):89-95.
[5] 杨海洋,黄桂桥.四种耐候钢在青岛大气环境暴露6年腐蚀数据分析[J].腐蚀与防护,2014,35(8):805-807.
[6] QIAN Y H, NIU D, XU J J, et al. The influence of chromium content on the electrochemical behavior of weathering steels[J]. Corrosion Science, 2013, 71: 72-77.
[7] QIAN Y H, MA C H, NIU D, et al. Influence of alloyed chromium on the atmospheric corrosion resistance of weathering steels[J]. Corrosion Science, 2013, 74: 424-429.
[8] ZHANG Q C, WU J S, WANG J J, et al. Corrosion behavior of weathering steel in marine atmosphere[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 77(2): 603-608.
[9] SCHWITTER H. Influence of accelerated weathering on the corrosion of low-alloy steels[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1980, 127(1): 15.
[10] 穆山.文昌地区大气腐蚀环境因素分析[J].装备环境工程,2010,7(5):119-122,127.
[11] 王建军,郭小丹,郑文龙,等.海洋大气暴露3年的碳钢与耐候钢表面锈层分析[J].腐蚀与防护,2002,23(7):288-291.
[12] 陈新彦,陈大明,陈旭,等.热带海洋大气环境中耐候钢腐蚀特征与机理的研究[J].腐蚀科学与防护技术,2018,30(2):150-156.
[13] RÉMAZEILLES C, REFAIT P. On the formation of $\beta\text{-FeOOH}$ (akaganéite) in chloride-containing environments [J]. Corrosion Science, 2007, 49(2): 844-857.
[14] 熊慧欣,周立祥.不同晶型羟基氧化铁(FeOOH)的形成及其在吸附去除 Cr(VI) 上的作用[J].岩石矿物学杂志,2008,27(6):559-566.
[15] DILLMANN P, MAZAUDIER F, HÆRLÉ 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.
[16] YAMASHITA M, KONISHI H, MIZUKI J, et al. Nanostructure of protective rust layer on weathering steel examined using synchrotron radiation X-rays[J]. Materials Transactions, 2004, 45(6): 1920-1924.
[17] ZHANG Q, WANG J, JIANGSHENG W U, et al. Effect of iron selective property on protective ability of rust layer formed on weathering steel exposed in the

(下转第649页)

验,获得了海洋大气环境中 42CrMo 钢的应力腐蚀门槛值为 $95.5 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$,裂纹稳定扩展速率为 $1.35 \times 10^{-9} \text{ m/s}$;同时发现,试样的初始加载强度对应力腐蚀裂纹扩展规律具有较大影响;

(2) 基于断裂力学建立了螺栓零件应力腐蚀安全性评估判据,通过评估确认了某发射平台不同规格 42CrMo 高强度螺栓无应力腐蚀开裂风险,确保产品使用的安全性;

(3) 高强度螺栓的应力腐蚀开裂风险随工作应力的增加而增大;在较小的轴向工作应力范围内,含微裂纹缺陷螺栓的抗应力腐蚀开裂性能随工作应力的增加而急剧下降。

参考文献:

[1] 王荣,孙明正.高强度螺栓失效分析[J].物理测试,2008,26(2):50-54.

[2] 刘德林,胡小春,何玉怀,等.从失效案例探讨钢制紧固件的氢脆问题[J].材料工程,2011,39(10):78-83.

[3] 惠卫军,董瀚,王毛球,等.耐延迟断裂性能优良的高强度螺栓钢[J].机械工程材料,2001,25(3):28-31,42.

[4] LEE H C, CHOI J M, LEE B, et al. Failure analysis of stress corrosion cracking in aircraft bolts[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(1): 209-217.

[5] CHEN B, XU Y L, QU W L. Corrosion damage assessment and monitoring of large steel space structures[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2010, 4(3): 354-369.

[6] 王会利,秦泗凤.高强螺栓节点腐蚀疲劳可靠度分析[J].青岛大学学报(工程技术版),2014,29(3):104-106,113.

[7] 胡兆吉,卢黎明,邓腾,等.含缺陷压力管道的应力腐蚀断裂及其安全评定[J].腐蚀科学与防护技术,2006,18

(1):76-78.

[8] 付长安,张显余,朱卫国.某型飞机主起落架固定螺栓应力腐蚀裂纹扩展寿命估算及解决方法[J].飞机设计,2010,30(6):23-25.

[9] 张晓云,孙志华,刘明辉,等.40CrNi₂Si₂MoVA 钢的大气应力腐蚀行为[J].中国腐蚀与防护学报,2006,26(5):275-281.

[10] QIN M, LI J F, CHEN S Y, et al. Experimental study on stress corrosion crack propagation rate of FV₅₂₀B in carbon dioxide and hydrogen sulfide solution[J]. Results in Physics, 2016, 6: 365-372.

[11] MATSUMOTO T, KUBOTA M, MATSUOKA S, et al. Threshold stress intensity factor for hydrogen-assisted cracking of CR-MO steel used as stationary storage buffer of a hydrogen refueling station[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(11): 7422-7428.

[12] KUMAR S S, PRAKASH R V. Effect of helix angle on the stress intensity factor of a cracked threaded bolt[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2013, 135(2): 021202.

[13] 尹峰,魏玉霖,刘欣.受拉螺栓表面裂纹应力强度因子的估算[J].沈阳航空工业学院学报,1994,11(3):14-20.

[14] 尹峰.螺纹要素对构件断裂力学特性影响的实验研究[J].航空学报,2002,23(4):346-348.

[15] 方栋,周展翅,刘军,等.16Co₁₄Ni₁₀Cr₂MoE 钢制 M56 螺栓的可靠性分析[J].材料开发与应用,2009,24(1):53-56.

[16] 李秀珍,邓华,吕杏梅,等.兆瓦级风力机偏航齿圈高强度联接螺栓螺纹表面裂纹扩展分析[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(1):91-98.

[17] Cr-Mo-V 系高强度钢的应力腐蚀开裂行为[J].材料热处理学报,2006,27(6):37-42,139.

(上接第 643 页)

marine atmosphere [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001,37(2):193-196.

[18] 陈长风,路民旭,赵国仙,等.温度、Cl⁻ 浓度、Cr 元素对 N80 钢 CO₂ 腐蚀电极过程的影响[J].金属学报,2003,39(8):848-854.

[19] 李晓刚,董超芳,肖葵,等.西沙海洋大气环境下典型材料腐蚀/老化行为与机理[M].北京:科学出版社,2014:

78-81.

[20] KAMIMURA T, KASHIMA K, SUGAE K, et al. The role of chloride ion on the atmospheric corrosion of steel and corrosion resistance of Sn-bearing steel [J]. Corrosion Science, 2012, 62:34-41.

[21] 汪川,曹公旺,潘辰,等.碳钢、耐候钢在 3 种典型大气环境中的腐蚀规律研究[J].中国腐蚀与防护学报,2016,36(1):39-46.