

低合金高强钢与 Q235 碳钢在成都大气环境中的 腐蚀行为

肖 盼¹, 李伟光¹, 潘吉林^{1,2}

(1. 电信科学技术第五研究所有限公司, 成都 610062;

2. 四川成都土壤环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 成都 610062)

摘 要: 采用大气暴晒试验和电化学测试, 研究了 3 种低合金高强钢(Q550 钢、40Cr 钢、35CrMoA 钢)和 Q235 碳钢在成都大气环境中暴晒 1 a 的腐蚀行为。研究表明:在成都大气环境中, Q550 钢、40Cr 钢、35CrMoA 钢和 Q235 碳钢的腐蚀速率分别为 80.07, 83.39, 80.66, 138.98 g/(m²·a), 最大蚀坑深度分别为 66.01, 40.86, 49.30, 45.18 μm; 4 种试样表面锈层成分基本相同, 主要由 γ-FeOOH、α-FeOOH、Fe₂O₃ 和 Fe₃O₄ 组成, 低合金高强钢表面锈层中 α-FeOOH 含量相较于 Q235 碳钢更高; Q235 碳钢表面锈层电阻高于 3 种低合金高强钢, 但由于腐蚀产物疏松且未能完整覆盖金属基体, 其腐蚀速率更大, 即 3 种低合金高强钢的耐蚀性均优于 Q235 碳钢。

关键词: 低合金高强钢; 大气腐蚀; 腐蚀速率; 电化学测试

中图分类号: TG174

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2024)12-0064-08

铁路铁轨需要大量的地脚螺栓来起到固定作用, 低合金高强钢具有较高的强度和韧性、良好的焊接性以及抗冲击性能^[1-3], 常被用于铁路地脚螺栓, 如 35CrMo 钢、40Cr 钢、Q345 钢和 Q550 钢等。地脚螺栓处于混凝土、碎石环境与大气环境的交接部位, 容易积水、积盐导致螺栓腐蚀。通常螺栓腐蚀较为隐蔽, 早期不易发现, 腐蚀容易导致螺栓断裂甚至铁轨松动等, 产生较大的安全隐患^[4]。文娟等^[5]研究了在重庆湿润气候环境中朝天门大桥断裂高强螺栓的腐蚀特性, 发现失效后的高强螺栓基体中存在大量 Fe、Mn、Si 等元素的氧化物及硫化铁, 推测高强螺栓的断裂失效与大气腐蚀(酸雨)、工业尘埃等环境有关。张彭辉等^[6]研究了 40Cr 钢在不同海域海水环境中的自然腐蚀行为, 发现 40Cr 钢在海水环境中的腐蚀较为严重且腐蚀形貌以蚀坑为主, 40Cr 钢中的碳含量较高导致其腐蚀速率高于普通碳钢。赵起越等^[7]通过分析 8 种低合金工程结构钢的腐蚀行为, 指出其耐蚀性除与传统的耐蚀指数 *I* 相关外, 还受钢中夹杂物、显微组织、晶粒度等多种材料因素的耦合影响。孙永

伟等^[8]研究了 Q345E 和 Cr-Ni-Cu 两种典型的低合金高强度钢的耐蚀性, 发现两种钢表面锈层成分主要为 γ-FeOOH、少量 α-FeOOH 和 Fe₃O₄, 其中 α-FeOOH 相增强了锈层的保护作用, Cr、Ni、Cu 等元素提高了钢的耐蚀性。

目前, 关于低合金高强钢在成都大气环境中的腐蚀数据较少, 相关的腐蚀规律和腐蚀机理还不太明确。因此, 笔者选取 3 种常用的低合金高强钢, 在成都大气环境中进行为期 1 a 的大气暴晒试验, 通过失重法、扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)以及电化学测试等方法获取相关的腐蚀数据, 并与 Q235 碳钢对比, 以期金属材料装备的长周期使用与防护提供参考。

1 试 验

试验材料为 Q550 钢、40Cr 钢、35CrMoA 钢和 Q235 碳钢(以下分别简称 Q550、40Cr、35CrMoA、Q235), 其主要化学成分如表 1 所示, 试样尺寸均为 100 mm×50 mm×3 mm。试验周期为 1 a, 自然环境暴露试验参照 GB/T 14165—2008《金属和合金大气腐蚀试验现场试验的一般要求》执行。每个周期放置 4 片试样, 其中 3 片用于计算腐蚀质量损失, 1 片用于分析锈层形貌结构^[9]。自然环境暴晒地点为四川省成都市, 表 2 为成都市暴露试验时间段内的空气质量数据。

收稿日期: 2022-12-29

基金项目: 科技基础资源调查专项(2021FY100600)

通信作者: 潘吉林(1980—), 正高级工程师, 博士, 主要研究方向为高分子材料形态结构控制、高分子基复合材料和新型涂料防护技术, panjilin@126.com

表 1 试验材料的化学成分
Tab. 1 Chemical composition of test materials

试验材料	质量分数/%												
	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Cu	Mo
Q235	0.18	0.3	0.42	0.014	0.016	—	—	—	—	—	—	—	—
Q550	0.12	0.3	1.45	0.015	0.003	0.018	0.039	0.004	0.02	0.194	0.01	0.015	0.001
40Cr	0.38	0.2	0.62	0.008	0.004	0.016	—	0.005	0.002	0.93	0.03	0.012	0.007
35CrMoA	0.39	0.36	0.52	0.013	0.018	—	—	—	—	0.95	—	—	0.185

表 2 成都市曝露试验时间段内的空气质量数据
Tab. 2 Air quality data during the exposure test period in Chengdu

日期	平均温度/℃	平均湿度/%	PM2.5/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{SO}_2)/$ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{CO})/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{NO}_2)/$ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{O}_3)/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
2021.07	27	80	22	26	5	0.59	135
2021.08	26	83	18	24	5	0.623	121
2021.09	23	85	19	23	5	0.61	101
2021.10	17	88	24	30	4	0.587	51
2021.11	11	84	50	39	6	0.637	43
2021.12	8	82	65	48	6	0.839	41
2022.01	7	83	67	40	5	0.935	45
2022.02	7	81	43	27	5	0.732	63
2022.03	17	69	48	41	6	0.684	108
2022.04	18	73	32	30	5	0.56	116
2022.05	21	76	30	29	5	0.584	123
2022.06	25	78	29	25	5	0.613	131
2022.07	28	71	25	22	4	0.577	165

注:相关数据来自空气质量在线监测分析平台 <https://www.aqistudy.cn>。

试验完成并取回试样后,按照 GB /T 16545—2015《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》标准规定的方法去除试样表面的腐蚀产物,计算试样在成都大气环境中暴晒 1 a 后的质量损失量。

参照 GB /T 16545 —2015《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》,用除锈液完全去除试样表面的腐蚀产物,之后在酒精中清洗彻底,用吹风机冷风吹干后称量。按照式(1)计算腐蚀速率。

$$v=\frac{m_1-m_2}{[2\times(a\times b+a\times c+b\times c)]\times t}\tag{1}$$

式中: v 为腐蚀速率, $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$; m_1 为试样原始质量, g ; m_2 为试样去除腐蚀产物后质量, g ; a 、 b 和 c 分别为试样长度、宽度和厚度, m ; t 为试样在大气中的暴晒时间, a 。

采用基恩士 VHX-7000 型超景深体视显微镜对带锈试样形貌和除锈后试样的蚀坑深度进行观察和统计。利用 Nova Nano SEM 450 型扫描电子显微镜观察试样表面腐蚀形貌,通过电镜自带的能谱仪(EDS)对腐蚀产物的主要元素及含量分布进行检测。采用 X 射线衍射仪分析腐蚀产物的物相组成。

电 化 学 测 试 在 瑞 士 万 通 Autolab PGSTAT302N 电化学工作站进行,采用传统三电极体系,其中铂电极为辅助电极,饱和氯化银电极(SSE)为参比电极,带锈试样为工作电极。测试前,测量开路电位(OCP)15 min,以稳定系统。动电位极化测量的扫描速率为 20 mV/min。电化学阻抗谱(EIS)测量在 $1\times 10^{-2}\sim 1\times 10^5$ Hz 频率范围内进行,潜在干扰幅度为 10 mV。测试溶液为 3.5%(质量分数)NaCl 溶液。

2 结果与讨论

2.1 腐蚀速率

通过计算可知,Q550、40Cr、35CrMoA 和 Q235 的腐蚀速率分别为 80.07、83.39、80.66、138.98 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。根据 GB/T 19292.1—2018《金属和合金的腐蚀大气腐蚀性第 1 部分:分类、测定和评估》评估 4 种试样的大气腐蚀等级,Q550、35CrMoA、40Cr 和 Q235 在成都大气环境中的腐蚀等级均为 C1,腐蚀程度较低。从腐蚀速率结果来看,在成都大气环境中低合金高强度钢的耐蚀性优于普通碳钢。

TOWNSEND^[10]研究表明,钢中 Cr、Cu、Ni、Sn 以及 Mo 等微量合金元素可提高其耐蚀性。根据表 1 可知,3 种低合金高强度钢中的 Cr、Mo 等元素含量均高于 Q235 钢。

2.2 腐蚀形貌

由图 1 可见:4 种试样表面均被腐蚀产物覆盖,已完全丧失金属光泽;Q550、35CrMoA 表面锈层

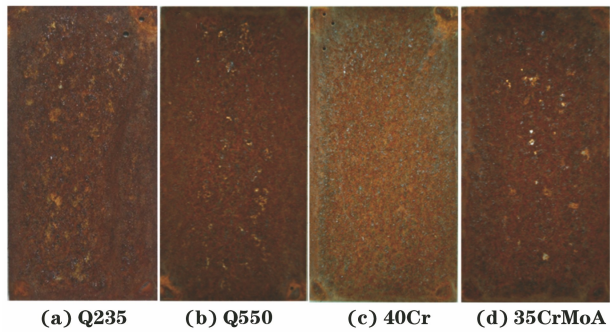


图 1 试样在成都大气环境中暴露 1 a 后的宏观形貌
Fig. 1 Macro-morphology of samples after exposure to atmospheric environment in Chengdu for 1 a

为黄褐色,腐蚀产物在基体表面分布相对均匀;40Cr 表面覆盖一层致密的黄棕色锈层;Q235 表面锈层呈现红褐色,腐蚀产物成团簇结构疏松分布在基体上,且存在较为明显的雨水冲刷痕迹,锈层表面有细小的裂纹。从宏观形貌来看,相较于低合金高强度钢,Q235 的腐蚀更严重,这与腐蚀速率结果相吻合。

如图 2 所示:4 种试样表面的腐蚀产物层叠覆盖在金属基体上,锈层出现不同程度的鼓泡开裂;Q235 表面腐蚀产物层的附着力较弱,部分区域发生脱落。Q550 表面锈层开裂的程度较小且未有明显的裂纹,腐蚀产物分布相对均匀。40Cr 和 35CrMoA 表面锈层出现较大的鼓泡开裂,开裂区域的腐蚀产物成黑褐色紧密团聚于锈层上。研究表明^[11-12],在锈层生成初期,锈层形成产生的应力会导致表面发生鼓泡开裂,Cr、Cu 等元素可以富集在内锈层中,对细小裂纹和微型孔洞进行修补,从而对金属基体起到保护作用。

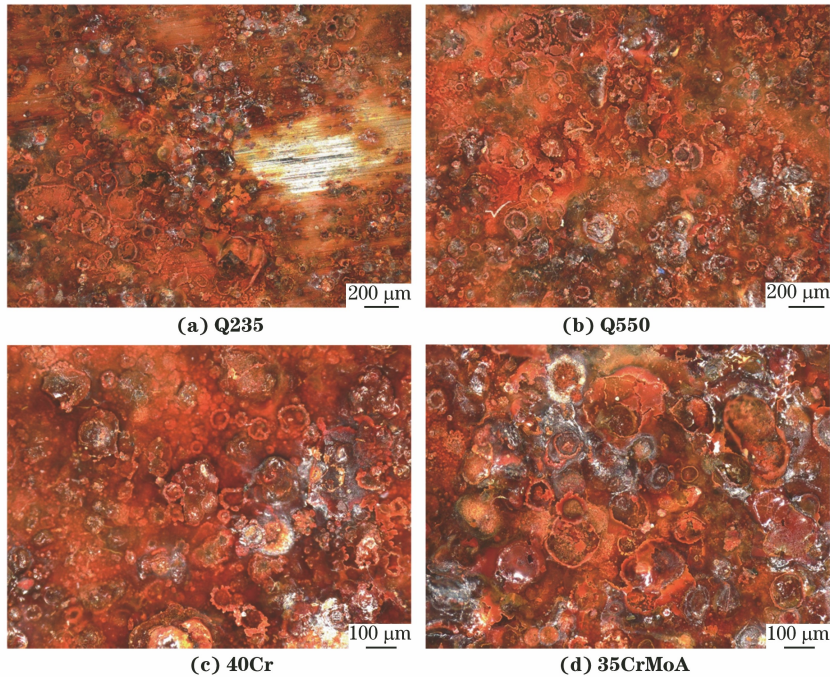


图 2 试样在成都大气环境中暴露 1 a 后的锈层微观形貌
Fig. 2 Micro-morphology of rust layer on the surface of samples after exposure to atmospheric environment in Chengdu for 1 a

由图 3 可见,4 种试样表面均出现大量的腐蚀坑。对多个区域内的蚀坑深度进行统计,Q235、Q550、40Cr 以及 35CrMoA 的最大蚀坑深度分别为 66.01,40.86,49.30,45.18 μm 。可以看出,Q235 表面蚀坑数量及最大蚀坑深度均高于 3 种低合金高强度钢,表明其腐蚀更严重。

由图 4 可见:Q235 表面腐蚀产物较输送且呈棉

絮状凹凸分布,Q550 和 40Cr 表面腐蚀产物致密平整且相对均匀,但 40Cr 的腐蚀产物有细小龟裂;35CrMoA 表面腐蚀产物呈胞状不均匀团聚。研究表明^[13-14],Ni 和 Cu 元素具有细化腐蚀产物物相结构的作用,随着大气腐蚀程度的进一步加重,锈层中的腐蚀产物会紧密堆积,从而有效阻挡空气和腐蚀介质进入金属基体表面,提高锈层对金属基体的保

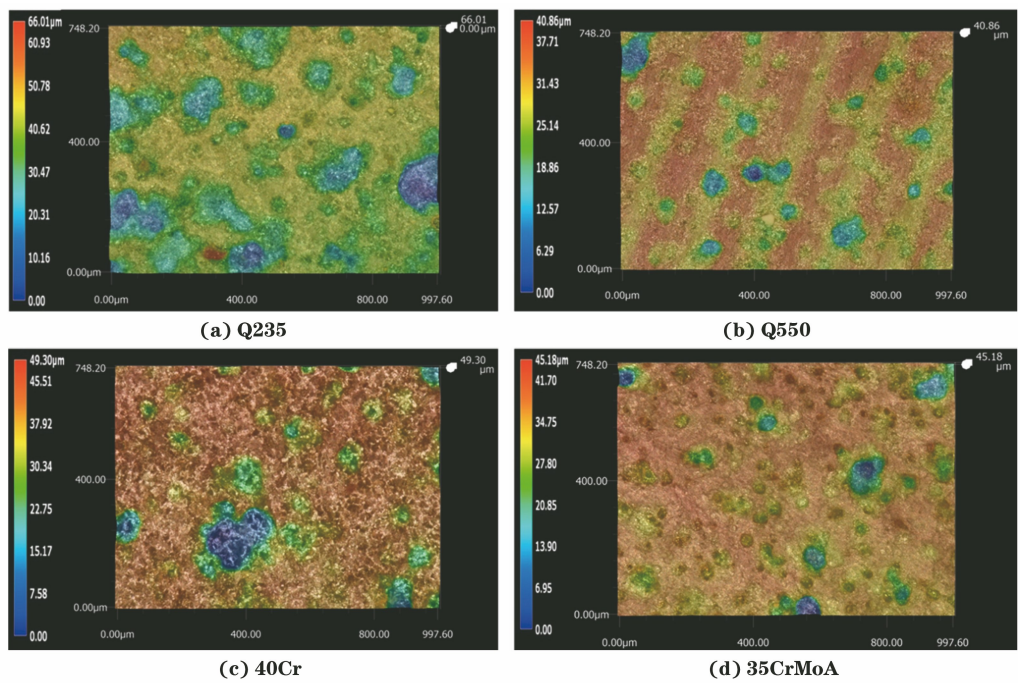


图 3 试样在成都大气环境中暴露 1 a 后表面蚀坑的微观形貌(去除腐蚀产物后)

Fig.3 Micro-morphology of surface corrosion pits of samples after exposure to atmospheric environment in Chengdu for 1 a (after removing the corrosion products)

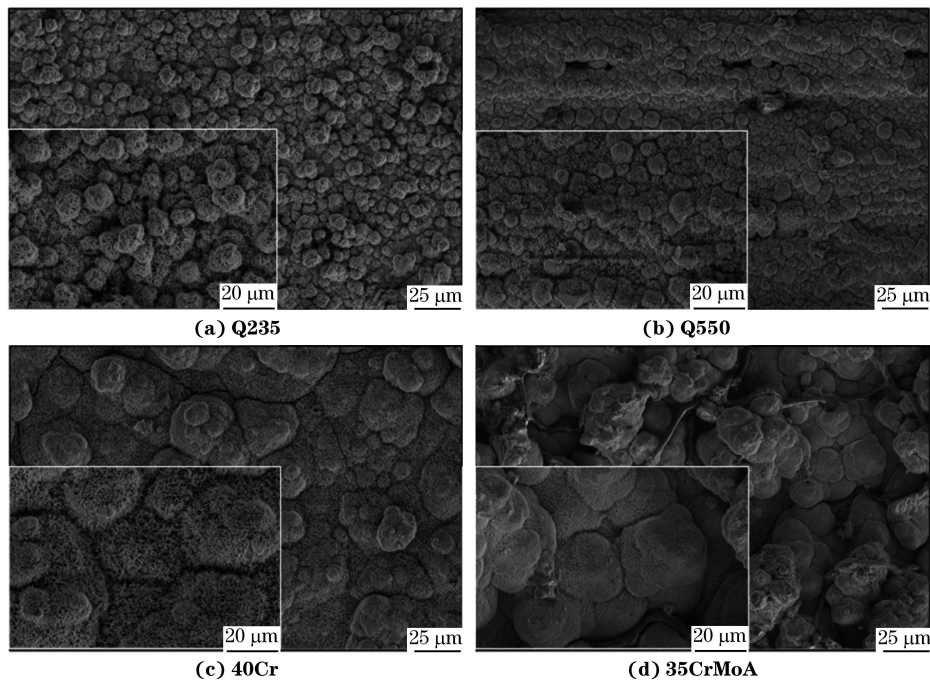


图 4 试样在成都大气环境中暴露 1 a 后的 SEM 形貌

Fig.4 SEM morphology of samples after exposure to atmospheric environment in Chengdu for 1 a

护性。Cr 元素易在锈层孔隙和微裂纹处富集,可以促进紧密锈层的形成。从宏观形貌和微观照片可以看出,Q550 和 40Cr 表面锈层结构和腐蚀产物分布较好,可有效减缓腐蚀。

2.3 腐蚀产物组成

如图 5 所示:4 种试样表面腐蚀产物的主要成

分基本相同,由 $\gamma\text{-FeOOH}$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 组成。Q235 表面腐蚀产物中 $\alpha\text{-FeOOH}$ 含量低于三种低合金高强度钢。在三种低合金高强度钢中,Q550 表面腐蚀产物中 $\alpha\text{-FeOOH}$ 含量最高。腐蚀初期试样表面的腐蚀产物以 $\gamma\text{-FeOOH}$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 为主;随着腐蚀的进行,基体表面生成的

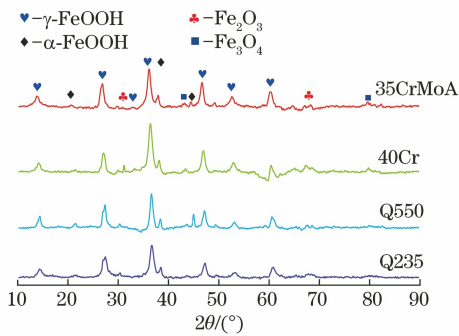


图 5 试样在成都大气环境中暴露 1 a 后的 XRD 谱

Fig. 5 XRD pattern of samples after exposure to atmospheric environment in Chengdu for 1 a

腐蚀产物会朝热力学稳定状态发展,FeOOH 可能逐渐向 Fe₃O₄ 和 Fe₂O₃ 转化。Cr、Cu 和 Mo 等微量元素的存在会明显加速钢的腐蚀产物转化为热力学稳定状态。

研究表明^[15-18],α-FeOOH 是保护性锈层的重要组分,其含量直接影响锈层的致密性。α-FeOOH

晶型相较于 γ-FeOOH 更为稳定,且容易形成较为致密的氧化物薄膜,可有效将金属基体与腐蚀产物隔绝,提高基体的耐蚀性。Cu 元素可以促进 γ-FeOOH 的结晶化,加快其向 α-FeOOH 的转化速率。Cr 元素可以有效置换 α-FeOOH 中的 Fe,细化 α-FeOOH 晶粒,从而使锈层更为均匀致密。由于 Q235 的腐蚀产物中 α-FeOOH 含量较少,其腐蚀速率较大。XRD 分析结果表明,Cu、Cr、Mo 等微量元素对腐蚀产物物相种类影响不大,低合金高强度钢的耐蚀性优于 Q235 可能是 Cu、Cr、Mo 等元素加速 α-FeOOH 的形成,提高了内锈层的致密性导致的。

如图 6 所示:4 种试样锈层的主要元素为 Fe、O,且元素含量相近,表明其腐蚀产物主要为铁的氧化物;在 35CrMoA 的能谱中发现 Si 元素,这可能是来自空气中的灰尘和污染物在暴晒过程中沉积到试样表面所致^[19]。

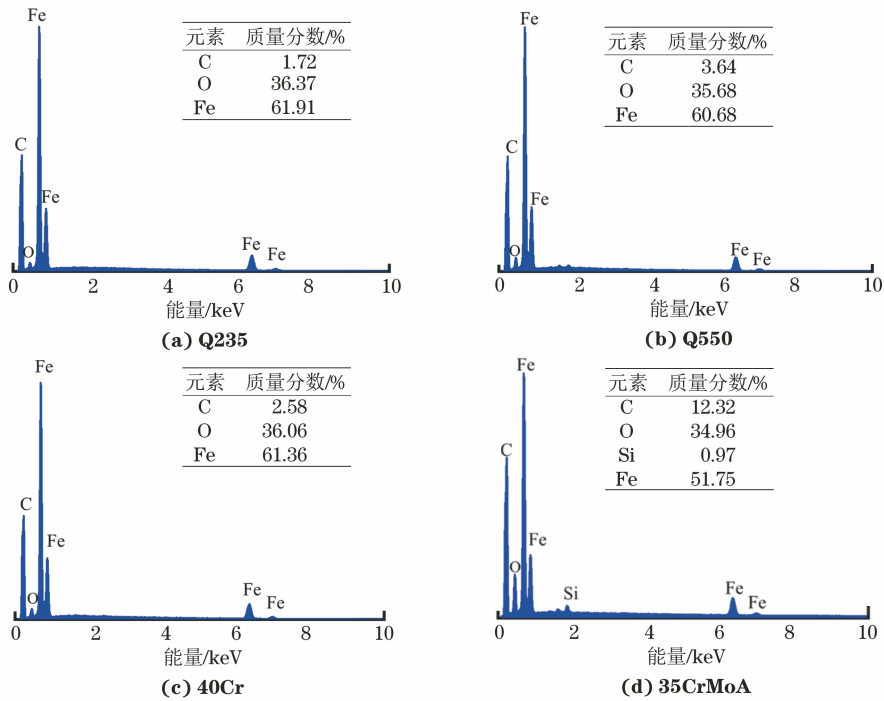


图 6 试样在成都大气环境中暴露 1 a 后的 EDS 谱

Fig. 6 EDS spectrum of samples after exposure to atmospheric environment in Chengdu for 1 a

2.4 电化学行为

金属在大气环境中的腐蚀本质是电化学反应,因此电化学测试可进一步评价锈层对金属基体的保护效果和腐蚀行为的影响^[20-21]。由图 7 可见,4 种试样的动电位极化曲线形状近似,阴极反应和阳极反应都呈现类似的规律,表明其腐蚀机理相似。腐蚀电位(E_{corr})与腐蚀电流密度(J_{corr})是评价锈层保护作用的两个重要参数, E_{corr} 越大,试样的腐蚀倾

向越强烈; J_{corr} 越大,表明其腐蚀速率越大。由表 3 可见,Q550、35CrMoA、40Cr 和 Q235 的 E_{corr} 和 J_{corr} 均依次增大,其拟合结果与腐蚀速率变化趋势相吻合。

由图 8 可见:4 种试样的电化学阻抗谱均由容抗弧组成,且在中低频区出现倾斜角接近 45° 的直线。这是 Warburg 阻抗的典型特征,即浓度极化阻抗,反映浓度和扩散对电极反应的影响,表明存在强

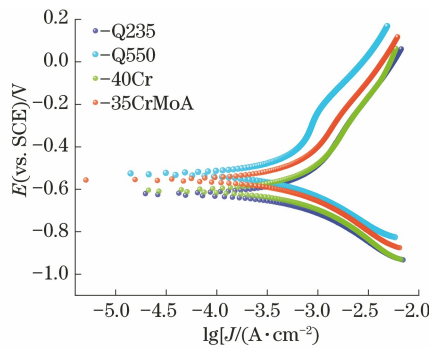


图 7 试样在成都大气环境中暴露 1 a 后的极化曲线
Fig. 7 Polarization curves of samples after exposure to atmospheric environment in Chengdu for 1 a

表 3 极化曲线拟合数据

Tab. 3 Polarization curve fitting data

试样	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
Q235	-0.624	1.632×10^{-4}
Q550	-0.519	8.765×10^{-5}
40Cr	-0.601	1.108×10^{-4}
35CrMoA	-0.556	7.972×10^{-5}

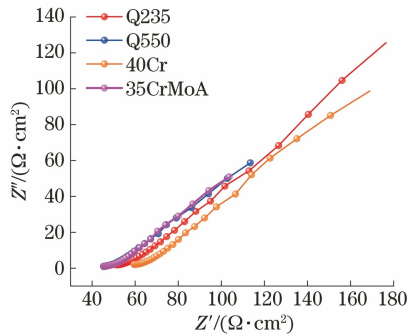


图 8 试样在成都大气环境中暴露 1 a 后的 Nyquist 图
Fig. 8 Nyquist plots of samples after exposure to atmospheric environment in Chengdu for 1 a

烈的扩散作用^[22]。通过 ZSimpwin 软件进行拟合,等效电路如图 9 所示,拟合得到各元件参数见表 4。其中: R_s 为溶液电阻; R_1 为锈层电阻; Q_1 为腐蚀产物层电容; W 为扩散层电阻。锈层电阻是评价锈层保护能力的关键参数,其值越大,表明电化学腐蚀越难发生。由表 4 可见,Q235 的 R_1 大于其他三种低合金高强度钢,这可能是 Q235 表面锈层较更厚所致。由于腐蚀产物层疏松且易脱落,未完全覆盖基体表面,不仅没有起到较好的保护作用,反而导致基体更

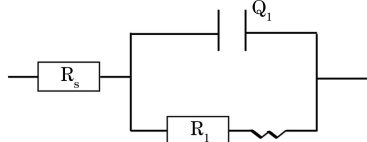


图 9 等效拟合电路图

Fig. 9 Equivalent fitting circuit diagram

易发生腐蚀。40Cr 的锈层电阻略高于 Q550,但 40Cr 中的碳含量明显高于 Q550,导致其腐蚀速率在相同条件下更高。

表 4 电化学阻抗谱拟合数据

Tab. 4 EIS fitting data

试样	$R_1/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$Q_1/(\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-2})$	$W/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$
Q550	9.186	9.304×10^{-3}	3.358×10^{-2}
40Cr	9.588	6.236×10^{-4}	4.455×10^{-3}
35CrMoA	8.235	6.829×10^{-3}	4.429×10^{-2}
Q235	23.81	9.834×10^{-3}	2.207×10^{-2}

3 结 论

(1) Q550、40Cr、35CrMoA 和 Q235 在成都大气环境中暴露 1 a 后的腐蚀速率分别为 80.07, 83.39, 80.66, 138.98 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,最大蚀坑深度分别为 66.01, 40.86, 49.30, 45.18 μm 。在成都大气环境中,低合金高强度钢的耐蚀性优于普通碳钢。

(2) 低合金高强度钢和 Q235 在成都大气环境暴晒 1 a 后的表面腐蚀产物成分基本相同,主要由 $\gamma\text{-FeOOH}$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 组成;3 种低合金高强度钢锈层中的 $\alpha\text{-FeOOH}$ 含量均高于 Q235。

(3) 试样的腐蚀速率与极化曲线的拟合结果相吻合,Q235 在成都大气环境中的锈层电阻高于 3 种低合金高强度钢,但由于生成的腐蚀产物疏松且未能完整覆盖金属基体,导致其腐蚀速率更大。

参考文献:

[1] 阎冬. 高强度耐候钢组织性能控制及耐候机理研究[D]. 沈阳:东北大学,2020.
YAN D. Study on microstructure and properties control and weathering mechanism of high strength weathering steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.
[2] 王育鑫,吴波,戴乐阳,等. 低合金钢在模拟海洋低温环境下的电偶腐蚀研究[J]. 中国腐蚀与防护学报,2022, 42(6): 894-902.
WANG Y X, WU B, DAI L Y, et al. Galvanic corrosion behavior for coupling of three low alloy steels in artificial seawater at low temperatures[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42 (6): 894-902.
[3] 万金剑. 高强度钢 A517Gr. Q 在模拟海水中的腐蚀行为及机理研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
WAN J J. Study on corrosion behavior and mechanism of high strength steel A517Gr. Q in simulated seawater [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.

- [4] 胡杰,邹定强,杨其全. 铁路用 20MnTiB 钢高强度螺栓的断裂失效分析[J]. 金属热处理, 2017, 42(7): 185-188.
HU J, ZOU D Q, YANG Q Q. Fracture failure analysis of 20MnTiB steel high strength bolt used for rail[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(7): 185-188.
- [5] 文娟,吴其荣,张卢喻,等. 钢结构桥梁的失效高强螺栓腐蚀产物特性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 321-328, 347.
WEN J, WU Q R, ZHANG L Y, et al. Research on the corrosion products of fracture failure high-strength bolt used in steel structure bridge [J]. Surface Technology, 2021, 50(5): 321-328, 347.
- [6] 张彭辉,赵建仓,丁康康,等. 不同海域 40Cr 低合金钢腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 114-120.
ZHANG P H, ZHAO J C, DING K K, et al. Study of 40Cr low alloy steel corrosion behaviour in different sea area [J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 114-120.
- [7] 赵起越,范益,范恩点,等. 低合金结构钢腐蚀的影响因素及其耐蚀性判据[J]. 工程科学学报, 2021, 43(2): 255-262.
ZHAO Q Y, FAN Y, FAN E D, et al. Influence factors and corrosion resistance criterion of low-alloy structural steel [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(2): 255-262.
- [8] 孙永伟,钟玉平,王灵水,等. 低合金高强度钢的耐模拟工业大气腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(3): 274-280.
SUN Y W, ZHONG Y P, WANG L S, et al. Corrosion behavior of low-alloy high strength steels in a simulated common SO₂-containing atmosphere [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(3): 274-280.
- [9] 王志高,海潮,姜杰,等. Q235 钢在德阳大气环境中腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(6): 871-876.
WANG Z G, HAI C, JIANG J, et al. Corrosion behavior of Q235 steels in atmosphere at Deyang district for one year [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(6): 871-876.
- [10] TOWNSEND H E. Effects of alloying elements on the corrosion of steel in industrial atmospheres [J]. Corrosion, 2001, 57(6): 497-501.
- [11] 石践,胡学文,何博,等. 耐候钢表面稳定化处理及锈层结构研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(5): 856-860.
SHI J, HU X W, HE B, et al. Surface stabilization and rust structure of weathering steel [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(5): 856-860.
- [12] 吕文婷. 合金元素 Cu 和 Cr 在低合金钢局部腐蚀过程中的协同效应[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
LYU W T. Synergistic effect of alloying elements Cu and Cr in local corrosion of low alloy steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [13] 李清. Q235 碳钢和 Q420 耐候钢在两种典型环境中的腐蚀行为及机理研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2020.
LI Q. Corrosion behavior and mechanism of Q235 carbon steel and Q420 weathering steel in two typical environments [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2020.
- [14] 刘涛,王胜民,赵晓军. 耐候钢锈层的稳定化处理及锈层形成[J]. 中国表面工程, 2019, 32(6): 98-104.
LIU T, WANG S M, ZHAO X J. Stabilization treatment and formation of rust layer on weathering steel [J]. China Surface Engineering, 2019, 32(6): 98-104.
- [15] 刘雨薇,赵洪涛,王振尧. 碳钢和耐候钢在南沙海洋大气环境中的初期腐蚀行为[J]. 金属学报, 2020, 56(9): 1247-1254.
LIU Y W, ZHAO H T, WANG Z Y. Initial corrosion behavior of carbon steel and weathering steel in Nansha marine atmosphere [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(9): 1247-1254.
- [16] 黄熠,马磊,许发宾,等. Cr 含量对低合金钢在高温高压高矿化度环境中耐腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(1): 38-43.
HUANG Y, MA L, XU F B, et al. Effect of Cr content on corrosion resistance of low alloy steels in a high temperature, high pressure and high salinity environment [J]. Corrosion & Protection, 2022, 43(1): 38-43.
- [17] 毛红艳,蔡庆伍,武会宾,等. 合金元素和碳含量对 E36 船板钢腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(6): 499-502.
MAO H Y, CAI Q W, WU H B, et al. Effect of alloy element and carbon content on corrosion behavior of E36 ship plate steel [J]. Corrosion @ Protection, 2013, 34(6): 499-502.
- [18] 邢文静,丁厚福,杜晓东,等. 碳含量对低碳高合金钢组织及耐腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺, 2006, 35(7): 35-37.
XING W J, DING H F, DU X D, et al. Effect of

carbon content on structure and corrosion property of low carbon high alloy steel [J]. Hot Working Technology, 2006, 35(7): 35-37.

[19] 田倩倩,海潮,王志高,等. Q235 碳钢在四川典型大气污染环境中的腐蚀行为研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2020, 46(5): 478-486.

TIAN Q Q, HAI C, WANG Z G, et al. Study on corrosion behavior of Q235 carbon steel in typical atmospheric pollution environment in Leshan, Sichuan province[J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2020, 46(5): 478-486.

[20] MA Y T, LI Y, WANG F H. The effect of β -FeOOH on the corrosion behavior of low carbon steel exposed in tropic marine environment[J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 112(3): 844-852.

[21] 尹程辉,潘吉林,陈俊航,等. 热带海洋大气环境下不锈钢的腐蚀寿命评估[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 183-193, 246.

YIN C H, PAN J L, CHEN J H, et al. Corrosion life assessment of stainless steel in tropical marine atmosphere[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 183-193, 246.

[22] 王力,郭春云,肖葵,等. Q235 和 Q450 钢在吐鲁番干热大气环境中长周期暴晒时的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(5): 431-437.

WANG L, GUO C Y, XIAO K, et al. Corrosion behavior of carbon steels Q235 and Q450 in dry hot atmosphere at Turpan district for four years [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2018, 38(5): 431-437.

Corrosion Behavior of Low Alloy High Strength Steel and Q235 Carbon Steel in Chengdu Atmospheric Environment

XIAO Pan¹, LI Weiguang¹, PAN Jilin^{1,2}

(1. The Fifth Research Institute of Telecommunications Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 610062, China;
2. Sichuan Chengdu National Field Science Observation and Research Station of Soil Environmental Materials Corrosion, Chengdu 610062, China)

Abstract: The corrosion behavior of three kinds of low alloy high strength steel (Q550 steel, 40Cr steel, 35CrMoA steel) and Q235 carbon steel exposed in Chengdu atmospheric environment for one year was studied by atmospheric exposure test and electrochemical test. The results showed that the corrosion rates of Q550 steel, 40 Cr steel, 35 CrMoA steel and Q235 carbon steel in Chengdu atmospheric environment were 80.07, 83.39, 80.66 and 138.98 g/(m²·a), respectively, and the maximum pit depths were 66.01, 40.86, 49.30, 45.18 μm, respectively. The composition of rust layer on the surface of the four samples was basically the same, mainly composed of γ-FeOOH, α-FeOOH, Fe₂O₃ and Fe₃O₄. The content of α-FeOOH in the rust layer on the surface of low alloy high strength steel was higher than that of Q235 carbon steel. The rust layer resistance of Q235 carbon steel was higher than that of three kinds of low alloy high strength steel. However, due to the loose corrosion products and the failure to completely cover the metal matrix, the corrosion rate was larger, that was, the corrosion resistance of three low alloy high strength steels was better than that of Q235 carbon steel.

Key words: low alloy high strength steel; atmospheric corrosion; corrosion rate; electrochemical test