

碳素结构钢在川藏地区的大气腐蚀行为研究

刘涛*, 王雅申, 吕尚霖#, 李晓滨

中冶建筑研究总院有限公司监测实验室, 北京

收稿日期: 2026年8月15日; 录用日期: 2026年9月11日; 发布日期: 2026年9月22日

摘要

为研究碳素结构钢在川藏地区复杂环境下大气腐蚀行为, 选择耐候指数不同的三种碳素结构钢放置于泸定、攀枝花和拉萨三地的河流周边开展自然腐蚀试验。经过一年的自然暴露后, 样品依据国标除锈后测定首年腐蚀质量损失并预测长期腐蚀质量损失, 采用SEM、EDS、XRD、Tafel极化、EIS对样品进行分析表征。结果表明泸定与拉萨样品首年腐蚀速率损失接近, 介于 $2.12 \mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ 至 $4.34 \mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$, 攀枝花存在工业大气污染, 导致锈层较厚且深度不均, 能谱分析得到较高浓度的S元素沉积, 低耐蚀性的DH36首年腐蚀速率达 $20.11 \mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。腐蚀产物以 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ 为主, Fe_3O_4 含量大于 Fe_2O_3 , $\alpha\text{-FeOOH}$ 含量显著低于文献报道的模拟试验结果。电化学分析表明锈层增厚有助于提高耐蚀性, 表现为腐蚀电位升高, 腐蚀交换电流密度降低以及阻抗增大, 耐候指数较高的两种钢材耐蚀性改善大于低耐候指数的钢材, 归因于锈层稳定性和致密性良好。

关键词

结构钢, 耐候钢, 高原环境, 腐蚀, 电化学分析

Study on Atmosphere Corrosion Behavior of Carbon Structural Steel in S in Sichuan and Xizang

Tao Liu*, Yashen Wang, Shanglin Lyu#, Xiaobin Li

Key Laboratory of Quality Inspection and Monitoring, Central Research Institute of Building and Construction CO. Ltd. MCC Group, Beijing

Received: August 15, 2026; accepted: September 11, 2026; published: September 22, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

To investigate the atmospheric corrosion behavior of carbon structural steels in the complex environments of the Sichuan-Xizang region, three types of carbon structural steels with different weathering indices were selected and subjected to natural corrosion tests near rivers in Luding, Panzhihua, and Lhasa. After one year of natural exposure, the samples were derusted in accordance with national standards to determine the first-year corrosion mass loss and to predict the long-term corrosion mass loss. The samples were characterized by SEM, EDS, XRD, Tafel polarization, and EIS. The results show that the first-year corrosion rates of the samples from Luding and Lhasa were similar, ranging from 2.12 to 4.34 $\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$. In Panzhihua, the presence of industrial atmospheric pollution led to thicker and more unevenly distributed rust layers, with EDS revealing relatively high sulfur deposition. The low-corrosion-resistance steel DH36 exhibited a first-year corrosion rate as high as 20.11 $\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$. The corrosion products were mainly composed of Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $\alpha\text{-FeOOH}$, and $\gamma\text{-FeOOH}$, with the Fe_3O_4 content being higher than that of Fe_2O_3 , and the $\alpha\text{-FeOOH}$ content being significantly lower than that reported in simulated test results in the literature. Electrochemical analysis indicated that the thickening of the rust layer contributed to improved corrosion resistance, as manifested by increased corrosion potential, decreased corrosion exchange current density, and increased impedance. The two steels with higher weathering indices showed greater improvement in corrosion resistance than the steel with a lower weathering index, which is attributed to the better stability and compactness of their rust layers.

Keywords

Structural Steel, Weathering Steel, Plateau Environment, Corrosion, Electrochemical Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

我国西部开发战略的不断推进,以川藏铁路、雅江下游水电站、南水北调西线工程为代表的一大批重点工程在川西和西藏地区施工。在这些重大工程中,交通路网建设是重中之重,川西横断山脉和西藏高海拔复杂环境给工程建设带来一系列困难。这其中钢结构桥梁的防腐蚀问题迎来新的挑战,首先高原的复杂环境是由多种环境变量造成,包括极端昼夜温差、强紫外线辐照、复杂化学氛围和电解质环境、湿度差异、冻融循环等,导致不同地区的钢材腐蚀机理和规律存在较大差异[1];其次由于高原环境恶劣,钢结构在服役后的定期维护较为困难且成本较高,难以实现在低海拔地区的维护频率。因此高原复杂环境下的钢结构桥梁在设计阶段必须合理选择钢材,实现力学性能和耐蚀性的合理匹配[2],提高钢结构整体耐蚀性,延长服役寿命并降低维护成本[3]。在此背景下,土木工程和桥梁行业大力推广使用耐候钢具有积极的意义[4],典型案例是拉林铁路西藏段的藏木雅鲁藏布江大桥采用免涂装耐候钢作为结构主体材料,这是我国真正意义上的首座免涂装钢结构桥梁[5]。

由于川藏地区地形环境复杂,影响结构钢腐蚀的因素存在极大差异,导致结构钢的腐蚀机理和动力学规律不同。此前已有部分学者和工程师开展了结构钢在川藏地区的耐蚀性研究,李伟光等[6][7]采用 Q420 碳钢在四川雅江和理塘地区开展大气暴露腐蚀试验,平均腐蚀速率分别为 $23.75\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $8.48\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$;王志高等[8]采用 Q235 钢在四川德阳地区三个不同位置开展大气暴露腐蚀试验,平均腐蚀速

率介于 $13.80 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 至 $40.18 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ，其中放置于工业企业密集区域的样品腐蚀速率最大并出现明显点蚀；吴红艳等[9]和兰涛等[10]分别采用 Q550qENH 和 Q500qENH 桥梁耐候钢及构件开展周浸试验模拟高原环境下的腐蚀，验证了该桥梁耐候钢在模拟环境下的耐蚀性能。整体来看，关于川藏复杂环境下结构钢腐蚀行为的研究和文献较少。

本文采用三种结构钢，选择泸定、攀枝花、拉萨三个地点作为川藏地区的典型代表，开展大气暴露自然腐蚀试验。在自然暴露 1 年后，采用腐蚀质量损失、SEM、能谱、XRD、电化学测试等手段，对 3 种结构钢的腐蚀产物进行分析表征。重点通过物相分析和电化学试验手段分析腐蚀产物对耐蚀性的贡献，探索其在川藏地区的腐蚀规律，预测未来腐蚀行为。目的是为川藏铁路为代表的川藏地区路网建设中的结构钢设计选择提供参照，为结构钢长周期服役和维护提供数据支撑。

2. 试验方法

2.1. 试验材料

大气暴露腐蚀试验采用的 3 种钢材的基本信息和理化性能如表 1 所示。3 种钢材的耐候指数不同，其中 Q500qENH 属于 Cu-P-Ni-Cr 系列耐候钢；SPH 属于高 P 含量耐候钢；DH36 属于常规碳钢，没有做耐候设计。样品通过线切割制成 $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 规格，每个钢材牌号制备 10 片该规格样品，采用磨床磨削至表面 4 级光洁度，用钢印编号，使用酒精清洗并干燥，精准称量，精确到 0.0001 g 。

Table 1. Basic information and chemical composition (wt%) of the three tested steel samples

表 1. 3 种试验钢材基本信息和化学成分(wt%)

牌号	生产企业	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	V	耐候指数 I
Q500qENH	南京钢铁股份有限公司	≥550	≥670	≤0.11	0.25~0.50	1.10~1.50	≤0.015	≤0.005	0.45~0.70	0.30~0.45	0.25~0.55	0.010~0.050	0.010~0.050	≥6.5
SPH	首钢集团迁安钢铁有限公司	394	517	≤0.11	0.27~0.37	0.03~0.04	0.075~0.12	≤0.005	0.30~0.40	0.05~0.09	0.25~0.30	≤0.015	≤0.015	≥8.0
DH36	首钢京唐钢铁联合有限责任公司	433	537	0.153	0.196	1.29	0.017	0.006	0.039	0.015	0.013	0.014	0.004	≥2.5

2.2. 大气暴露自然腐蚀

选择在泸定、攀枝花和拉萨三个地点开展大气暴露腐蚀试验，原因是这三地能够代表典型的川藏地区复杂环境，也是川藏铁路沿线和川藏地区路网建设的必经之路。泸定是围绕大渡河的河谷地区，海拔差较大，全年湿度较高。攀枝花日照时间较长，气温较高，属于工业城市，具备工业大气腐蚀的特征条件。拉萨是典型高海拔干燥气候，全年日照时间极长，紫外线强度高。环境参数和放置地点如表 2 所示，数据来源是国家气象和水文数据中心以及当地政府官网。

放置地点选择在当地水系附近，模拟桥梁结构钢的服役环境，原始样品和现场环境如图 1 所示。试验架采用铝合金架，与水平面成 45° 角，朝向正南放置，并做防风处理。采用陶瓷螺栓固定样品，避免异质金属接触。其他样品放置要求遵循 GB/T 14165-2008《金属和合金 大气腐蚀试验 现场试验的一般要求》[11]。

Table 2. Environmental parameters of the exposure sites in Luding, Panzhihua, and Lhasa
表 2. 泸定、攀枝花和拉萨放置点的环境参数

地区	四川泸定县	四川攀枝花市	西藏拉萨市
气候	亚热带季风气候	南亚热带干河谷气候	高原温带半干旱季风气候
全年降水量(mm)	600~800	700~900	300~400
全年平均湿度(%)	60~70	50~60	35~45
全年日照时数(h)	1800	2700	>3000
最高气温(℃)	34~36	40~42	29~31
最低气温(℃)	-5~-3	0~2	-16~-14
年平均气温(℃)	15~16	20~21	8~9
紫外线强度等级	5~7	8~10	10~11+
样品放置地经纬度	北纬 29.94 东经 102.23	北纬 26.59 东经 101.77	北纬 29.67 东经 90.95
样品放置地附近水系	大渡河	金沙江	堆龙曲
样品放置地海拔(m)	1617	1343	3650
年度 SO ₂ 平均浓度(μg/m ³)	4.91	38.07	7.44

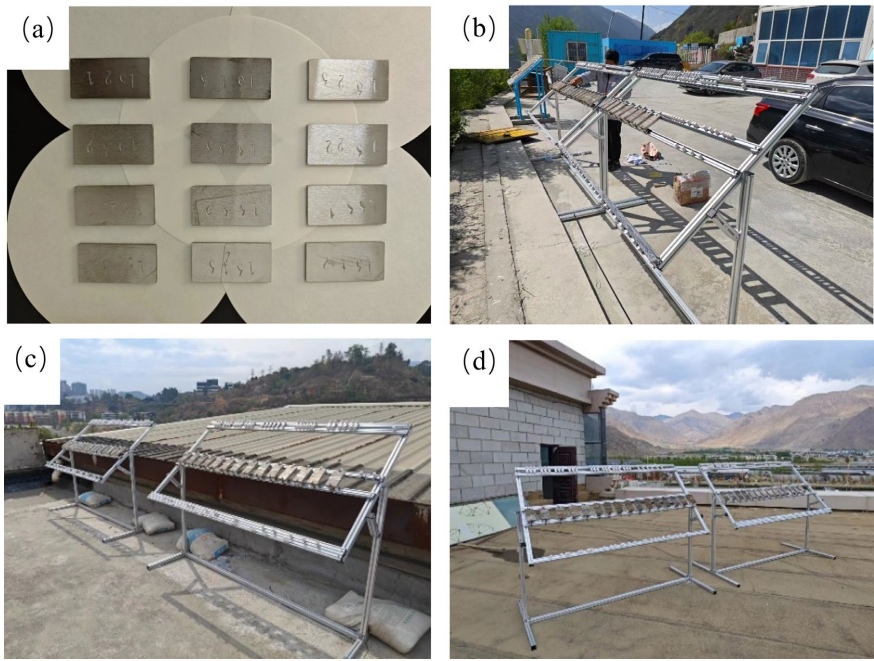


Figure 1. Original morphology of the samples and the placement conditions in Luding, Panzhihua, and Lhasa: (a) Original morphology of the samples; (b), (c), and (d) show the on-site placement conditions of the samples in Luding, Panzhihua, and Lhasa, respectively

图 1. 样品原始形貌以及泸定、攀枝花和拉萨样品放置情况: (a)为样品原始形貌, (b)、(c)、(d)分别为泸定、攀枝花和拉萨放置样品现场情况

2.3. 分析表征

样品经过 1 年自然暴露后收回, 其中 5 个样品进行除锈后测算腐蚀质量损失, 其余 5 个样品用于其

他分析表征。依据 GB/T 16545-2015《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》[12]进行锈层清除,除锈剂使用 3.5 g 六次甲基四胺、500 ml 盐酸和 500 ml 水的混合液,在室温下除锈时间为 10min,除锈后使用水和乙醇反复清洗并烘干,分析天平称重,计算腐蚀速率并取平均值。

样品线切割后得到横截面,采用标准金相方法制备金相样品。采用日本电子的 JCM-6000PLUS 扫描电子显微镜(SEM)观察样品锈层表面和横截面微观形貌,加速电压为 15kV,工作距离 48mm。采用 SEM 内置的能谱仪对锈层元素含量进行半定量分析,重点分析 S 和 Cl 相对含量。

使用日本 Rigaku 公司的 Ultima IV 型 X 射线衍射仪分析锈层表面,测角范围 $5^{\circ}\sim 80^{\circ}$,步长为 0.02° ,扫描速度 2°min^{-1} 。重点关注 Fe_2O_3 (Hamertite), Fe_3O_4 (Magnetite), $\alpha\text{-FeOOH}$ (Goethite), $\beta\text{-FeOOH}$ (Akaganeite), $\gamma\text{-FeOOH}$ (Lepidocrocite) 5 种铁氧化物。

使用德国 Zahner 的 CIMPS-2Pro 电化学工作站对锈蚀样品表面开展电化学试验。样品与导线焊接后使用环氧树脂作为密封材料,仅保留待测面暴露并充当工作电极,实验采用三电极系统配置,以 Ag/AgCl 电极充当参比电极,以铂电极为辅助电极,工作电解液为 3.5%NaCl 溶液。试验流程为开路电位测量,交流阻抗,最后进行标准 Tafel 极化试验。其中瞬态测量测试频率范围在 10^5 Hz 至 10^{-1} Hz ;稳态极化测量范围选定在开路电位-1.2 V~1.2 V,扫描速率为 5 mV/s。由于川藏地区自然环境中 Cl 离子浓度较低,NaCl 溶液作为电解液所引起的腐蚀机理与自然环境腐蚀并不一致,本研究选择 NaCl 溶液主要考虑两个因素,一是方便与其他文献中报道的电化学试验结果进行平行对比,二是评价不同牌号和放置地点形成锈层的相对耐蚀性是成立的。

3. 质量损失与腐蚀速率

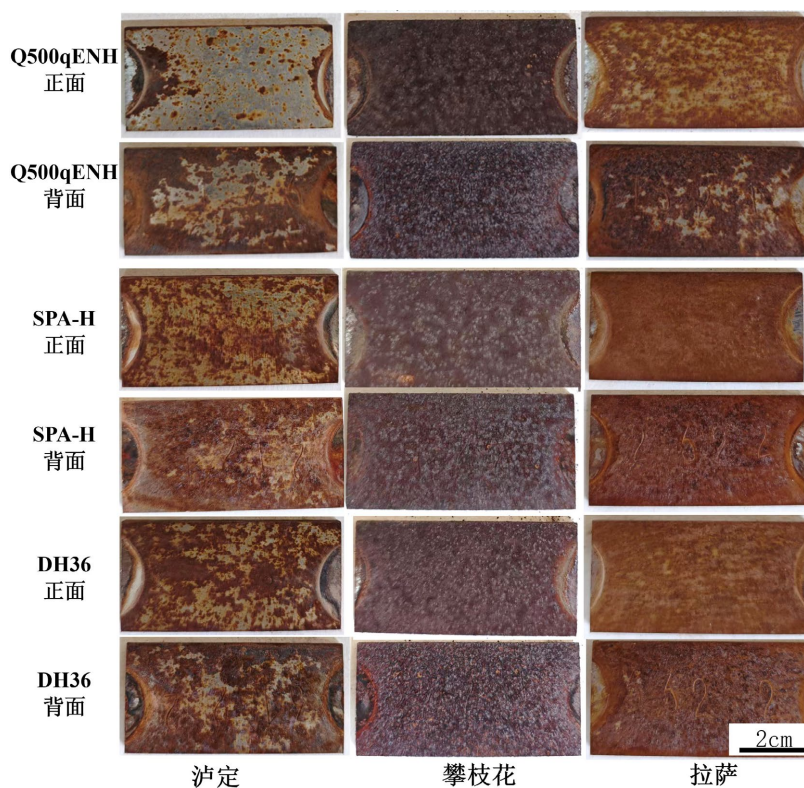


Figure 2. Macroscopic corrosion morphology of three types of steel after one year of natural exposure in Luding, Panzhihua, and Lhasa

图 2. 3 种钢材在泸定、攀枝花、拉萨三地自然暴露 1 年后宏观腐蚀状况

图 2 所示为 3 种钢材自然放置 1 年后表面腐蚀宏观状况。从 3 种钢材腐蚀外观形貌可见所有样品的背面腐蚀比正面腐蚀严重，特别是泸定的样品，主要原因是试样背面容易驻留雨水，电解液浸泡的时间更长。泸定的样品与拉萨的样品在锈层分布上存在较大区别，其中泸定的样品锈层倾向于不均匀分布，3 种钢材样品表面都还存在部分区域保持金属形貌，主要原因是该地区降雨较多，雨水更容易吸附在疏松的锈层区域，构成电化学腐蚀，出现腐蚀差异化。放置于拉萨的样品倾向于均匀腐蚀，锈层分布较为均衡，该地区干旱少雨，空气平均湿度较低，多数时间不满足电化学腐蚀条件，直接氧化是主要锈蚀机制。攀枝花的样品腐蚀较严重，这主要是因为该地区有一定工业污染，大气中的 O_3 和 S 含量较高，含 S 阴离子基团能降低雨水 PH 值，并提高雨水电导率，加速腐蚀。横向比较 3 种钢材的宏观腐蚀状态，Q500qENH 耐蚀性较 SPA-H 和 DH36 更高，特别是在泸定和拉萨地区，暴露一年后仍有部分区域保持金属形貌。

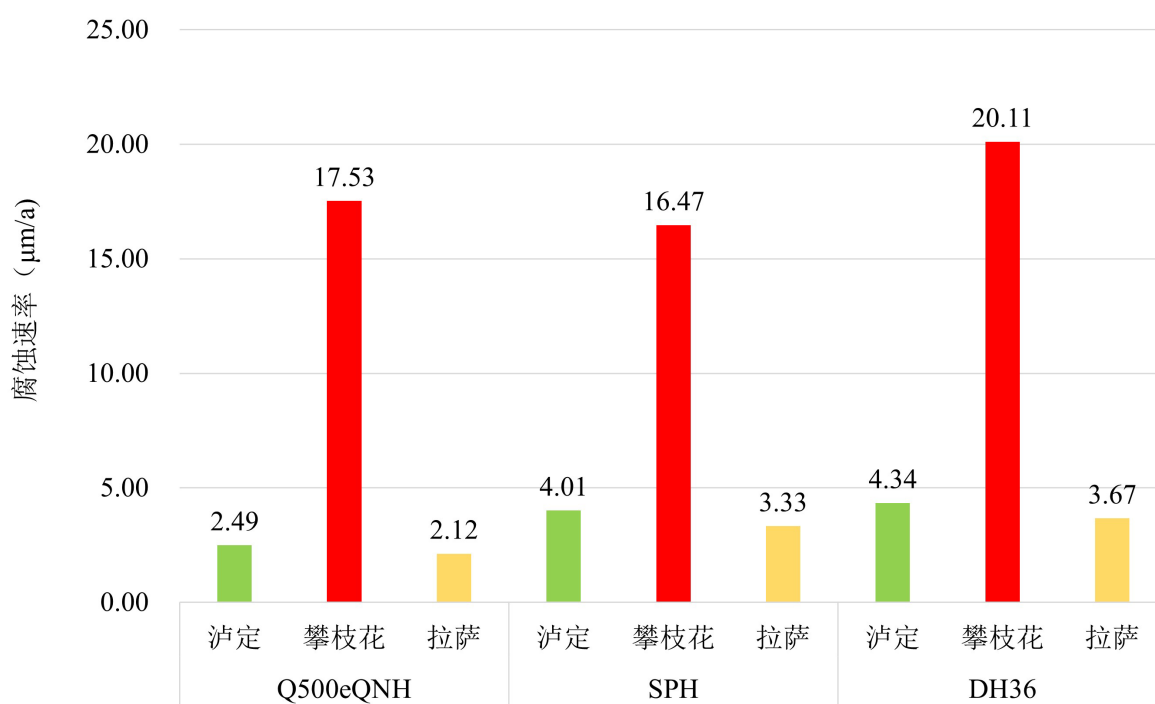


Figure 3. First-year corrosion rates of the three types of steel samples

图 3. 3 种钢材样品首年腐蚀速率值

经过除锈后，计算各钢材样品首年腐蚀质量损失，进而得到首年腐蚀速率值如图 3 所示。所有钢材样品在攀枝花地区的腐蚀量较大，泸定和拉萨腐蚀速率较为接近，与样品宏观表面形貌相符。从结果可见，Q500eQNH 与 SPH 腐蚀速率低于 DH36。根据国标 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》[13]，属于 C1 或 C2 大气腐蚀等级，攀枝花属于 C2 或 C3 大气腐蚀等级。

考虑到大气腐蚀等级较低，腐蚀速率较低，可采用 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》中的方法，通过测定首年腐蚀量对未来腐蚀总量进行推算，具体方法如下。

$$D(100 \leq D \leq 20) = r_{corr} \left[20^b + b(20^{b-1})(t - 20) \right] \quad (1)$$

其中, D 为若干年之后腐蚀总量, 单位为 μm ; r_{corr} 为首年腐蚀速率, 单位为 $\mu\text{m a}^{-1}$; t 为时间, 单位为年; b 为金属环境特性参量, 此处可取值 $b = 0.575$ 。

根据以上计算方法, 得到 3 种钢材 20 年和 100 年最大腐蚀量预测值, 如表 3。从百年预测腐蚀量来看, 在泸定和拉萨地区腐蚀量都较低, 不超过百微米量级。而在攀枝花地区, 预测腐蚀量在 0.3~0.5 mm 区间, 腐蚀量随着钢材耐候指数提高而下降。需要注意的是该腐蚀预测模型是基于常规碳钢的长期试验, 并且考虑锈层达到一定厚度后, 锈层自然剥落的速率等于锈层向基体内发展的速率, 腐蚀速率将达到一个稳态。该模型未考虑的是钢材冶炼添加耐蚀性元素, 通过锈层强化等机制达到降低腐蚀速率的效果。因此可以预见, Q500eQNH 和 SPH 在 20 年以上的腐蚀质量损失应低于模型预测, 需要通过更长时间的自然暴露试验, 建立腐蚀速率和时间的动力学模型进行精确预测。

Table 3. Predicted total corrosion amount of the three types of steel over the next 20 years based on the first-year corrosion rate

表 3. 根据首年腐蚀速率预测 3 种钢材未来 20 年腐蚀总量

钢材牌号	地点	20 年腐蚀总量预测(μm)	100 年腐蚀总量预测(μm)
Q500eQNH	泸定	13.96	46.06
	攀枝花	98.12	323.79
	拉萨	11.90	39.26
SPH	泸定	22.44	74.06
	攀枝花	92.21	304.29
	拉萨	18.62	61.45
DH36	泸定	24.27	80.10
	攀枝花	112.62	371.63
	拉萨	20.53	67.74

4. 显微分析

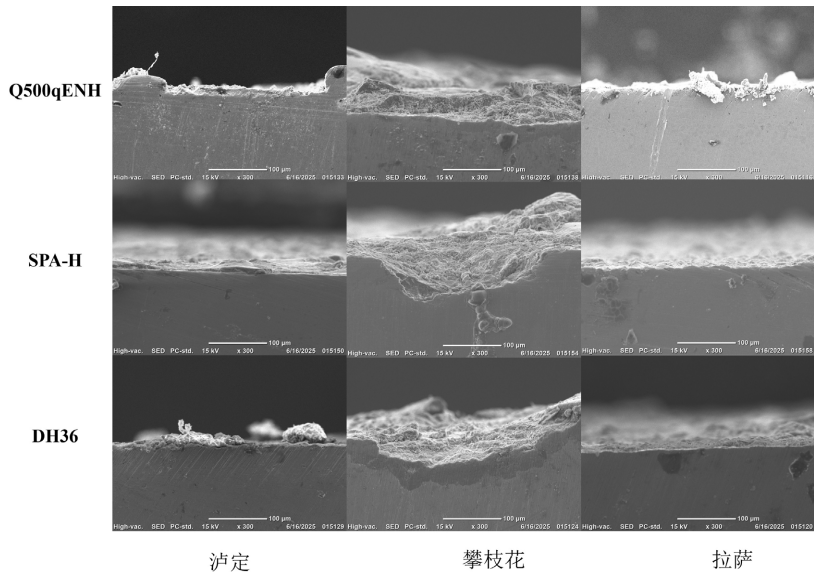


Figure 4. Cross-sectional SEM morphologies of the corroded samples after field exposure
图 4. 3 种钢材现场腐蚀样品横截面 SEM 形貌

图4是3种钢材样品锈层横截面的SEM放大相。3种钢材在泸定和拉萨的样品几乎无法从横截面观察到氧化物,表面较为平直,锈层没有深入基体,与腐蚀质量损失计算结论相符。在攀枝花的样品,3种钢材都不同程度地出现不规则的表面,锈层明显向基体内部发展。虽然观察到腐蚀进展速率有差异,部分地区腐蚀较深,但3种钢材都没有观察到典型局部点蚀的形貌。

Table 4. Relative sulfur content (wt%) on the corroded surfaces of steel samples determined by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)

表 4. 钢材样品腐蚀表面能谱分析 S 相对含量(wt%)

	泸定	攀枝花	拉萨
Q500eQNH	0.06	0.51	0.02
SPH	0.08	0.53	-
DH36	0.04	0.49	-

对三种钢材表面锈层在SEM下做能谱分析(EDS),重点关注S元素的半定量关系,其相对含量如表4所示。从结果可知,攀枝花的所有样品中S含量明显高于泸定和拉萨的样品,符合当地工业大气特征,而SPH与DH36在拉萨的样品锈层中未检出S元素。攀枝花大气中浓度较高的含硫阴离子基团引起电解液环境PH值下降,以及当地监测到较高的O₃污染物共同作用[14],导致攀枝花样品自然腐蚀速率大于泸定和拉萨样品。

5. XRD 物相分析

从全谱图线中可见,所有样品XRD谱中都有明显的Fe₂O₃和Fe₃O₄特征峰位,表明锈层已经构成较为稳定的结构,有一定的机械强度,能够有效降低腐蚀速率。泸定和拉萨的样品各特征峰位都较为明显,攀枝花的样品因锈层太厚,铁素体主峰已经被部分遮盖,导致Fe特征衍射峰强度明显降低。

由于FeOOH强度较高的特征衍射峰都位于20°<40°的低角度区间,需要分析低角度衍射峰对锈层的物相进行进一步讨论。首先β-FeOOH(310)晶面为100%If的衍射主峰2θ=26.7°,γ-FeOOH(210)晶面为100%If的衍射主峰2θ=27.0°,这两个衍射主峰较为接近,而β-FeOOH(211)晶面为次强(55%If)特征衍射峰位2θ=35.1°,从图5(b)~(d)中可见,35°位置没有明显衍射峰,再考虑到β-FeOOH的产生过程需要在Cl⁻浓度较大的环境中[15],因此可以忽略β-FeOOH的含量,2θ=27°的衍射峰由γ-FeOOH(210)晶面和Fe₂O₃的(022)晶面(20%If)叠加构成。

在2θ=21.2°为α-FeOOH(110)晶面100%If衍射主峰,但在本实验中该位置没有明显峰位,仅在攀枝花的样品中有较为微弱的信号,由此判定在本实验中样品锈层内的α-FeOOH含量较低。该结论与模拟实验所报道的结果相差较大,可能的原因是高原现场环境下的腐蚀有较为明显的干湿周期,在无降雨的日照周期中湿度较低,样品表面温度较高促进FeOOH的脱H过程,导致FeOOH向Fe₂O₃和Fe₃O₄快速转变。而模拟实验一般采用周浸实验或盐雾实验,在密闭空间中环境湿度较大,也难以模拟日照下样品表面较高的温度,导致FeOOH的脱H过程受抑制,累积较多的α-FeOOH。进一步对比Fe₂O₃和Fe₃O₄两种物相,注意到在2θ=32.8°为100%If的Fe₂O₃(420)晶面,且附近有2θ=31.4°的Fe₃O₄(220)晶面(29%If)与之重叠,但该位置衍射强度较低,结合2θ=37.0°较为明显的衍射峰为100%If的Fe₃O₄(311)晶面,可判断Fe₂O₃含量低于Fe₃O₄。

综合以上分析,现场腐蚀试验得到的腐蚀产物以Fe₂O₃、Fe₃O₄、α-FeOOH、γ-FeOOH为主,Fe₃O₄含量大于Fe₂O₃。三种钢材在泸定和拉萨腐蚀较轻的条件下,其XRD衍射特征较为接近,而在攀枝花的样

品中耐候指数较高的 Q500eQNH 和 SPH 都表现出 γ -FeOOH 衍射主峰强度明显下降,表明随着锈层增大, FeOOH 大部分转变为稳定 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 使锈层具备较高的化学稳定性和耐蚀习惯。与模拟实验相比, α -FeOOH 的含量较低, 仅在攀枝花的样品中可见明显的 α -FeOOH 衍射主峰, 表明实际环境中, FeOOH 不是稳定存在的结构, 日照和高温促进其脱 H 过程。从整体的物相分布来看, 虽然三种钢材的耐候指数不同, 但锈层氧化物化学成分一致, 没有明显物相差异, 表明低碳钢在同一环境下腐蚀机理趋同, 差异在于腐蚀动力学。

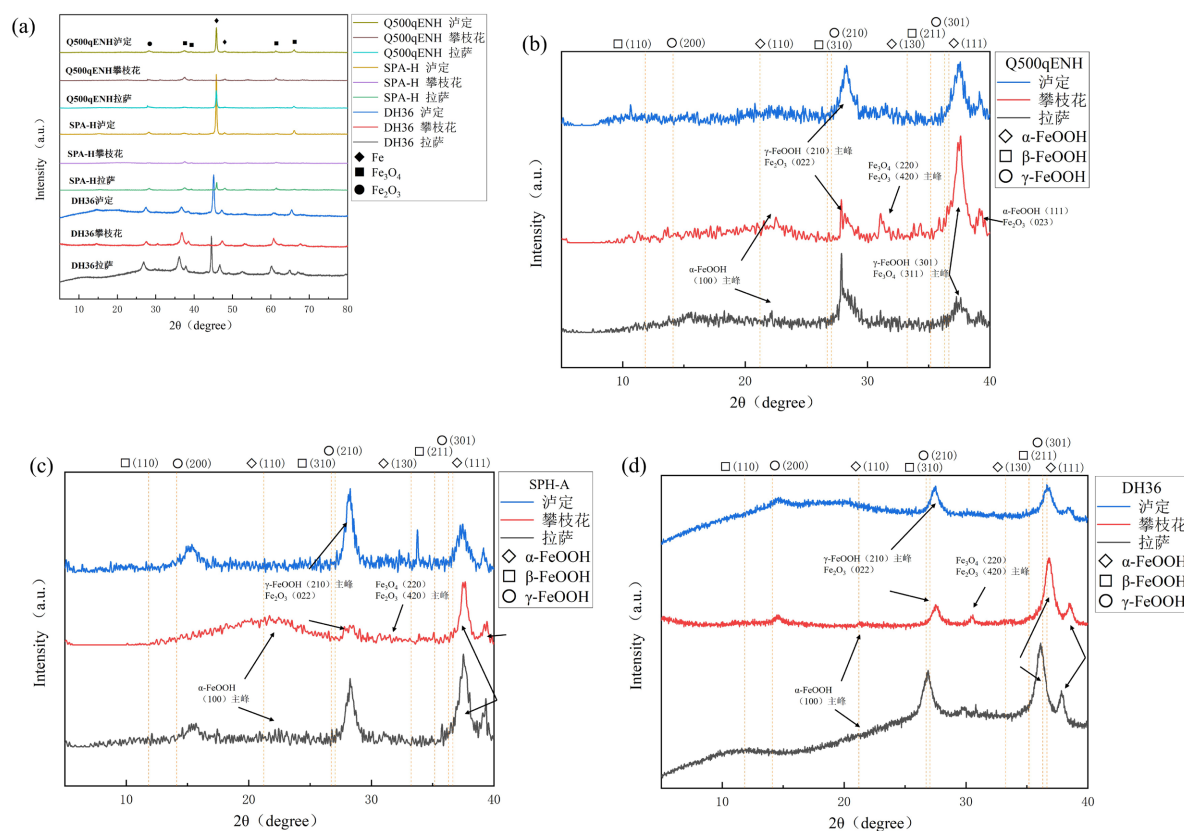


Figure 5. XRD analysis of the corroded sample surfaces: (a) Full XRD patterns; (b) Low-angle region of the Q500qENH sample; (c) Low-angle region of the SPH sample; (d) Low-angle region of the DH36 sample

图 5. 腐蚀样品表面 XRD 分析, 其中(a) XRD 全谱; (b) Q500qENH 样品低角度区域; (c) SPH 样品低角度区域; (d) DH36 样品低角度区域

6. 电化学分析

6.1. Tafel 极化

图 6 为 3 种钢材 Tafel 极化曲线, 并采用强极化区切线法测量腐蚀交换电流密度, 为避免阳极分支的测量误差对实验结果的影响, 通过使用极化曲线的阴极分支与腐蚀电位的交点从而确定腐蚀交换电流密度(以下简称 i_{corr}), 阴极分支 Tafel 斜率在 $-120 \text{ mV} \sim -60 \text{ mV}$ 范围内进行选取确定。从结果可见, 泸定和拉萨的锈蚀程度接近, 腐蚀电位接近。泸定的 i_{corr} 略大于拉萨, 原因是泸定的样品表面锈层分布不均, 在电解液中出现较为明确的阴阳极分化, 而拉萨的样品表面锈层覆盖均匀, 待测面阴阳极面积比增大, 降低自腐蚀速率。攀枝花的样品锈层较厚, 腐蚀电位大幅提高, i_{corr} 大幅下降, 特别是 Q500eQNH 与 SPA-H 的 i_{corr} 下降了一个数量级, 表明耐候钢锈层能够有效阻碍金属发生电化学腐蚀。而 DH36 的 i_{corr} 下降幅

度不大,可能是由于锈层较为疏松,无法有效阻断电解液与金属基体接触。

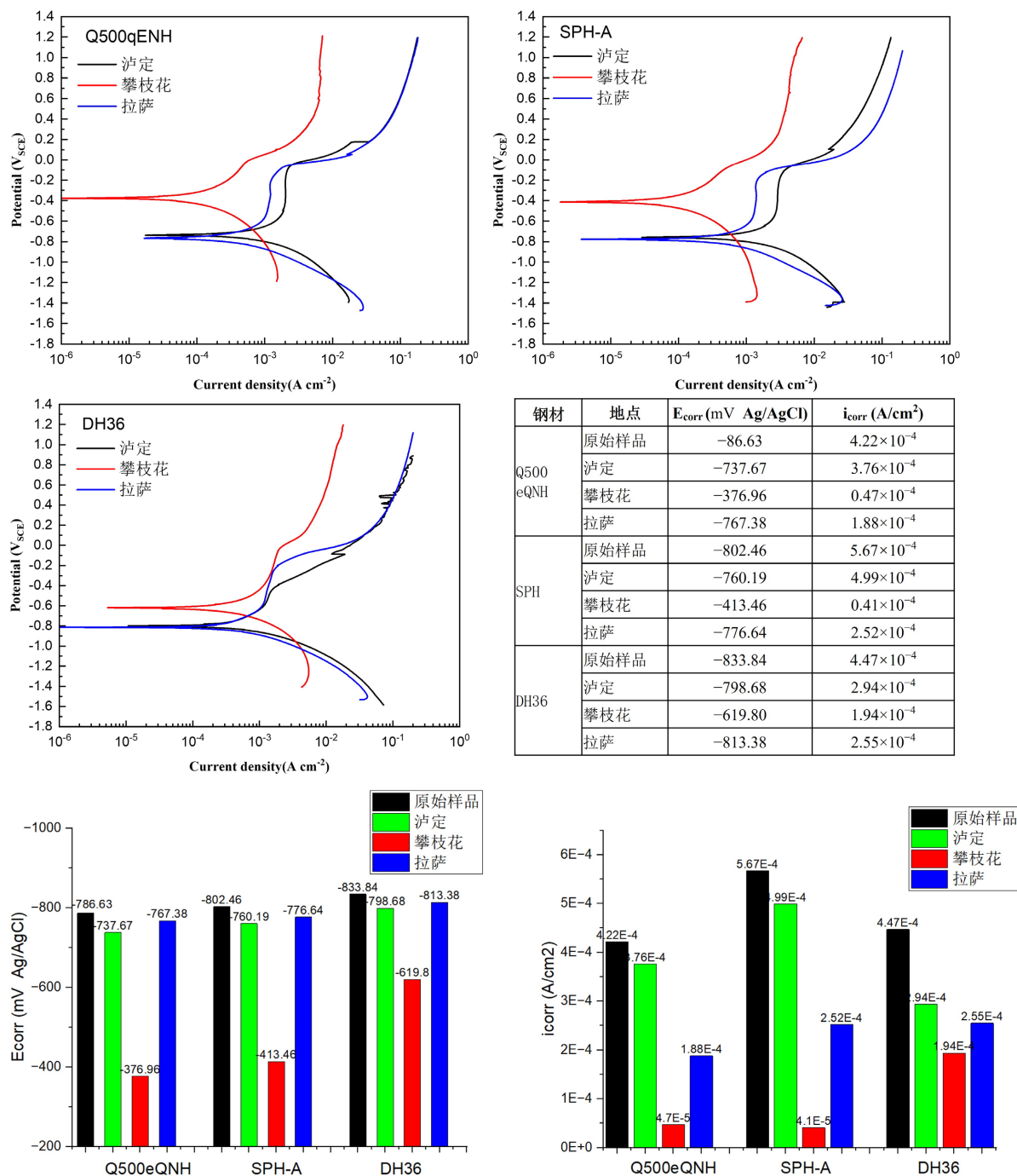


Figure 6. Tafel polarization curves of the three types of steel samples, along with the fitted corrosion potential (E_{corr}) and corrosion exchange current density (i_{corr})

图 6. 3 种钢材样品 Tafel 极化曲线以及拟合计算腐蚀电位 E_{corr} 与腐蚀交换电流密度 i_{corr}

6.2. 交流阻抗

EIS 测试频率范围在 10^5 Hz 至 10^{-1} Hz。在每隔十倍频率中,低频区范围每 15 个数据点取平均值,

高频区范围每 20 个数据点取平均值。

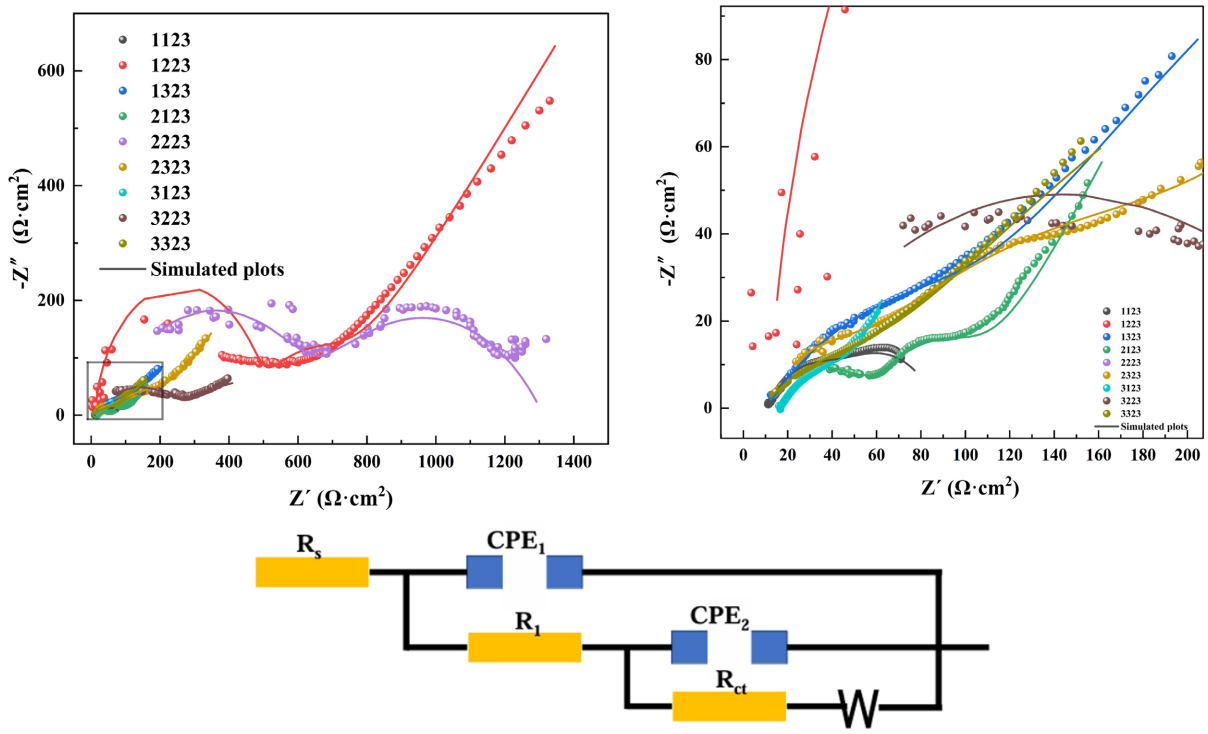


Figure 7. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and the corresponding equivalent circuit diagram
图 7. 交流阻抗谱以及等效电路图

Table 5. Fitted parameter values of electrical elements obtained from electrochemical impedance spectroscopy (EIS)
表 5. 交流阻抗谱拟合各电学元件拟合值

钢材	地点	Rs Ω·cm ²	CPE1		R1 Ω·cm ²	CPE2		R2 Ω·cm ²
			Y01 S·secn·cm ⁻²	n1		Y02 S·secn·cm ⁻²	n2	
Q500eQNH	泸定	7.09	8.84E-04	0.564	39.6	9.82E-03	0.577	37.02
	攀枝花	6.80	1.45E-07	0.945	487.5	5.32E-05	0.784	698.4
	拉萨	9.17	1.15E-03	0.423	135.6	6.78E-03	0.517	250.3
SPH	泸定	3.25	9.73E-05	0.368	62.18	7.00E-04	0.610	49.3
	攀枝花	4.36	5.17E-07	0.671	614.6	8.54E-05	0.581	655.6
	拉萨	8.15	1.29E-05	0.618	42.14	7.42E-04	0.409	223.4
DH36	泸定	6.26	7.07E-03	0.432	53.7	3.46E-02	0.739	334.2
	攀枝花	8.57	2.55E-05	0.453	257.2	4.67E-03	0.355	412.6
	拉萨	7.95	1.45E-03	0.355	74.83	6.81E-03	0.384	72.4

如图 7 所示，对交流阻抗数据进行电路拟合，得到等效电路图。根据交流阻抗值与频率的关系，测算各电化学元件参数值如表 5 所示。其中，Rs 为溶液阻抗，鉴于试验配置和条件一致，Rs 均为 10Ω·cm²

以内的值。CPE1 可以理解为最外层铁氧化物形成的双电层带来的非法拉第阻抗,从阻抗谱图线中注意到,所有阻抗弧极其理论延长部分构成的半圆将有部分出现在第四象限,即在高频段都绕原点顺时针旋转一个角度,因此必须用常相位角元件表示该阻抗,其中 n 为弥散系数,取值为 0 到 1 之间,表示常相位角元件偏离标准电容的程度。R1 应理解为电荷穿过最外层铁氧化物的双电层带来的法拉第阻抗。电解质或电荷在穿越氧化物后将与内部金属基体接触,CPE2 应理解为内层金属基体形成的双电层带来的非法拉第阻抗,R2 为电荷穿越金属基体双电层的法拉第阻抗。

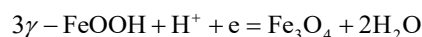
从结果可见,所有攀枝花的样品两个电荷转移电阻与 CPE 值均大于泸定和拉萨的样品。可见随着锈层增厚,法拉第阻抗和非法拉第阻抗都将大幅升高,特别是 Q500eQNH 的 CPE 值,攀枝花样品比泸定和拉萨样品高出 2 到 3 个数量级。R1 与 R2 进行比较,随着锈层增厚,R1 的改变较为规律,R2 的变化规律相对复杂,这是由于内层电荷转移受到影响因素更多,与锈层结构、基体内禀性质、电解液、测量电路配置等都有关系。横向比较三种钢材可见 Q500eQNH 和 SPH 攀枝花样品的 R1 值较泸定和拉萨的样品提升了一个数量级,表明随着锈层增厚,电荷转移阻力将明显增大。而 DH36 的 R1 和 CPE 提升相对较小,可能的原因是耐候指数较低的钢材,形成锈层较为疏松,电解液容易穿透,且腐蚀交换电流密度较大。因此从交流阻抗的角度来看,两种耐候钢的锈层可以有效阻碍电荷交换,在雨水或微液滴存在的情况下,能够有效降低电化学腐蚀速率。

7. 讨论

7.1. 环境对腐蚀的影响

本实验所选择的三个地点环境差异较大,泸定地区平均湿度较大,钢材腐蚀表现出典型的雨水干湿循环特征,电解液易于在样品背面残留,导致背面腐蚀量大于正面。同时,因电解液残留宏观上分布不均,造成锈层分布不均。拉萨地区属于干燥气候,降雨较少,夜间形成的微小液滴吸附在表面是电化学腐蚀的主要因素,表现为锈层分布较为均匀。拉萨地区较为独特的环境因素是高强度的紫外线辐照,而根据有关研究报道,紫外线辐照对低碳钢和碳素钢的耐蚀性影响较小[16]。从物相组成、首年腐蚀量和电化学特征来看,同一牌号的样品在拉萨和泸定自然暴露一年后都较为接近,可以认为在这两个地区腐蚀产物的形成机制、腐蚀速率和对耐蚀性的贡献是一致的。

攀枝花的样品首年腐蚀量远大于泸定和拉萨的样品,主要原因是当地工业大气含有 S 的氧化物和 O₃ 污染物,容易在样品表面形成低 Ph 值和强氧化性的电解质环境,叠加较为频繁的干湿循环,造成锈层快速发展。从截面的金相形貌来看,快速腐蚀导致腐蚀深度出现明显不均匀,但没有造成明显的点蚀。较厚的锈层有效阻隔铁素体基体与电解质的接触,改变腐蚀电位、电流密度和阻抗,与电化学试验的结论相符。和泸定和拉萨的样品相比,攀枝花的样品锈层中 γ -FeOOH 对(Fe₂O₃ + Fe₃O₄)含量的比例明显下降,可归因于富 H⁺的低 Ph 值电解质环境中,促使 γ -FeOOH 发生阴极反应[17]:



7.2. 钢材牌号对腐蚀的影响

Q500eQNH 和 SPH 两种耐候指数较高的钢材在三个地区的首年腐蚀损失量均明显低于 DH36,具体的腐蚀产物分布特征上存在差异。从化学成分来看,Q500eQNH 属于富 Ni-Cr-Cu 系耐候钢,其中 Ni 和 Cr 改善钢材耐蚀性的机制包括提高腐蚀电位并降低腐蚀电流,促进腐蚀产物形核并细化腐蚀产物晶粒,构建离子选择性双电层[18][19]。因此在泸定高湿度造成长时间的电化学腐蚀条件环境下,Q500eQNH 的耐蚀性优于 SPH。而 SPH 中的 P 含量达到 0.075wt%,已经接近高磷钢的范围,P 对耐蚀性贡献的机制是加速氧化,促进非晶态氧化物形成,快速形成致密氧化层以阻断后续腐蚀进程[20][21]。在攀枝花的强腐

蚀环境中, SPH 首年腐蚀量低于 Q500eQNH, 表明 SPH 致密的腐蚀产物有效降低后续腐蚀。同时 SPH 在攀枝花的样品 XRD 特征衍射峰强度明显降低, 可归因于大量非晶态腐蚀产物形成。

7.3. 试验周期影响

由于时间所限, 目前仅提供首年腐蚀损失量, 并应用 GB/T 19292.1-2018 的经验公式对长期腐蚀量进行预测。考虑到耐候钢的特性, 随着锈层逐渐增厚, 腐蚀产物的物相逐渐向更稳定的铁氧化物转变, 腐蚀速率的下降将偏离经验公式的预测。特别是 P 含量较高的 SPH, 受到 P 元素的影响导致前期腐蚀速率较大, 而后期腐蚀速率将大幅下降, 实际百年腐蚀深度将大幅偏离预测值。为了得到较为准确的预测, 需要更长周期的自然腐蚀试验数据, 并通过多点拟合构建腐蚀动力学曲线, 并以此进行长期腐蚀行为的推算。

8. 结论

(1) 选择三种耐候指数和耐蚀机理不同的结构钢, 放置于泸定、攀枝花和拉萨进行自然腐蚀试验。在大气腐蚀等级较低的泸定和拉萨, Q500eQNH 的首年腐蚀量明显低于 SPH 和 DH36; 而在高腐蚀等级的攀枝花, SPH 首年腐蚀量最低。该现象归因于 Q500eQNH 和 SPH 不同的耐蚀性元素造成的耐蚀性机理差异。

(2) 基于样品横截面的 SEM 相, 攀枝花的样品腐蚀严重, 出现局部腐蚀深度差异, 但没有出现点蚀。XRD 分析表明三种钢材的腐蚀产物主要由 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ 组成, 与模拟腐蚀试验结果差异较大的是现场试验的腐蚀产物中 $\alpha\text{-FeOOH}$ 的含量远低于模拟实验, 可能的原因是模拟实验湿度较大, 抑制 $\alpha\text{-FeOOH}$ 转变为其他铁氧化物。攀枝花样品腐蚀产物中, $\gamma\text{-FeOOH}$ 对 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4)$ 含量的比例明显低于泸定和拉萨, 可归因于当地工业污染造成的低 Ph 值高氧化性电解质环境。

(3) 极化试验表明攀枝花的样品锈层厚度大于泸定和拉萨样品, 其腐蚀电位明显高于泸定和拉萨样品, 腐蚀交换电流密度明显下降。DH36 腐蚀电位和腐蚀交换电流密度虽然有变化, 但变化幅度小于另外两种高耐候指数的钢材。交流阻抗谱表明样品表面等效电路可分解为两组法拉第阻抗和非法拉第阻抗的串并联, 分别对应电解质和锈层界面以及锈层和基体界面, 阻抗值与腐蚀深度成正比。

(4) 从试验周期来看, 首年腐蚀速率虽然是最重要的腐蚀动力学指标之一, 但由于耐候钢的腐蚀动力学与常规碳钢不同, 采用经验公式进行预测将与实际情况产生较大偏离, 因此需要更长周期的自然腐蚀试验提供数据, 并建立长期腐蚀动力学模型进行较为精确的预测。

基金项目

国家自然科学基金资助项目: 现代混凝土结构多屏障耐久性设计与控制理论方法研究(批准号: 52038004)。

参考文献

- [1] 毛新平, 武会宾, 汤启波. 我国桥梁结构钢的发展与创新[J]. 现代交通与冶金材料, 2021, 1(6): 1-5.
- [2] 麻亚鑫, 贾潇, 杨宇龙, 等. 回火温度对 500MPa 级海工钢组织性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(12): 1465-1475.
- [3] 凌广. 耐候钢在川藏公路某大跨径桥梁设计中的应用[J]. 公路, 2022, 67(6): 154-158.
- [4] 张宇, 郑凯锋, 衡俊霖. 免涂装耐候钢桥梁腐蚀设计方法现状及展望[J]. 钢结构, 2018, 33(9): 116-121, 52.
- [5] 韩建华. 高海拔寒冷地区公路设计理念与方法及其应用[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.
- [6] 李伟光, 肖盼, 潘吉林, 等. 川西高原及峡谷地区雨季气候及其对碳钢腐蚀的影响[J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(6):

- 38-43.
- [7] 李伟光, 肖盼, 潘吉林, 等. Q420 碳钢在川西高原地区大气环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(10): 13-17.
 - [8] 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.
 - [9] 吴红艳, 王琬淇, 彭存财, 等. 高原环境耐候桥梁钢 Q550qENH 组织性能及腐蚀行为研究[J]. 钢结构(中英文), 2025, 40(11): 1-7.
 - [10] 兰涛, 刘彦辰, 张晓巍, 等. Q500qENH 耐候钢焊接接头模拟高原腐蚀行为研究[J]. 工业建筑, 2025, 55(9): 42-52.
 - [11] 丁国清, 李倩, 张波, 等. GB/T 14165-2008 金属和合金 大气腐蚀试验 现场试验的一般要求[S]. 2008.
<https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=4689E0A7AF52FE31C83B33AA0A18AC50>
 - [12] 王书强, 李倩, 陆筱彬, 等. GB/T 16545-2015 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除[S]. 2015.
<https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=01C0C4BC7905D85D13A8158F2E331863>
 - [13] 王振尧, 潘晨, 侯捷, 等. 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[S]. 2018.
<https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=B6AABBD66CDA5D1193C470F74F6A4573>
 - [14] 曹雪莹, 叶芝祥. 2015-2019 年攀枝花市大气污染物时空变化特征分析[C]//中国环境科学学会 2021 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场. 天津, 2021: 184-199.
 - [15] Misawa, T., Asami, K., Hashimoto, K. and Shimodaira, S. (1974) The Mechanism of Atmospheric Rusting and the Protective Amorphous Rust on Low Alloy Steel. *Corrosion Science*, **14**, 279-289.
[https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(74\)80037-5](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(74)80037-5)
 - [16] 宋立英. 紫外辐射对 Q235 碳钢/09CuPCrNi 耐候钢大气腐蚀过程影响机制的研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2015.
 - [17] Evans, U.R. (1965) Electrochemical Mechanism of Atmospheric Rusting. *Nature*, **206**, 980-982.
<https://doi.org/10.1038/206980a0>
 - [18] 王博. 锰、铬及钒氮合金化在低碳耐候钢中的作用机理[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2008.
 - [19] 周鲁军. 耐候钢锈层损伤特征及其对腐蚀行为的影响[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2021.
 - [20] 高吉祥. 薄板坯连铸连轧超高强耐候钢的组织性能研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.
 - [21] 岳丽杰. Cu-P-RE 耐候钢中稀土行为作用及机理的研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2006.