

· 产品研发 ·



环保型免涂装高强高耐蚀公路护栏用钢开发

李 显^{1,2}, 田俊羽¹, 陈成刚³, 黄艳花³, 韦龙周²

(1 武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081;

2 广西柳州钢铁集团有限公司, 柳州 545002; 3 广西机械工业研究院有限责任公司, 南宁 530007)

摘要:在国家“双碳”背景下,开发一种环保型免涂装高强高耐蚀公路护栏用钢 LG500EW,以解决传统护栏用镀锌普碳钢 Q235 强度低、耐蚀性差及镀锌处理环境污染严重的问题,提升公路护栏的安全性和使用寿命,降低全产业链的碳排放。LG500EW 钢采用低 C 高 Cr,微量 Cu、Ni 的成分设计,匹配 TMCP 轧制工艺,保证耐蚀性和成形性,产品实际抗拉强度可达到 600 MPa 级别。通过高低温湿热试验箱进行干湿交替循环试验,结合 SEM 分析、金相分析、腐蚀失重测量、电化学分析等方法,研究了免涂装高强高耐蚀公路护栏用钢 LG500EW、镀锌普碳钢 Q235 及常规低合金 Q355B 在模拟工业海洋性大气环境中的耐腐蚀性能。结果表明,在工业海洋性大气腐蚀环境中, LG500EW 钢和镀锌普碳钢 Q235 的耐大气腐蚀性能均优于常规低合金钢 Q355B。随着模拟加速试验时间的延长,镀锌普碳钢 Q235 的腐蚀速率持续增加,直至形成镀层下铁基体的腐蚀行为;而 LG500EW 钢随着腐蚀时间增长,保护性锈层逐渐生成,最外层锈层形成了较致密且完整的板甲状腐蚀产物层,腐蚀产物中 α -FeOOH 的衍射峰强度明显升高,自腐蚀电位上升,自腐蚀电流降低,腐蚀 32 天后, LG500EW 钢的腐蚀减薄量为 90 μm ,接近镀锌普碳钢 Q235 腐蚀减薄量 40 μm 的 2 倍,显示出优异的耐蚀性能。环保型免涂装高强高耐蚀公路护栏用钢在工业海洋性大气环境中表现出优于传统护栏用钢的性能。该研究成果已成功应用于免涂装公路护栏,具有显著的经济效益、社会效益和生态效益。

关键词:免涂装; 高强; 高耐蚀; 公路护栏; 工业海洋性大气环境; 成分设计

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N250546 中图分类号: TG178

Development of an Eco-Friendly Coating-Free, High-Strength and High-Corrosion-Resistant Steel for Highway Guardrails

Li Xian^{1,2}, Tian Junyu¹, Chen Chenggang³, Huang Yanhua³, Wei Longzhou²

(1 State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan

430081, China; 2 Guangxi Liuzhou Iron and Steel Group Co., Ltd., Liuzhou 545002, China;

3 Guangxi Machinery Industry Research Institute Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: Under the national "Dual Carbon" goals, an environmentally friendly, coating-free, high-strength, and high-corrosion-resistant highway guardrail steel, LG500EW, has been developed. This addresses issues with traditional galvanized plain carbon steel Q235, such as low strength, poor corrosion resistance, and significant environmental pollution caused by galvanizing processes, thereby improving the safety and service life of highway guardrails while reducing carbon emissions across the entire industry chain. LG500EW employs a alloy design of low carbon, high chromium, and trace amounts of copper and nickel, combined with Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) rolling to ensure corrosion resistance and formability. The actual tensile strength of the product can reach the 600 MPa. Using a temperature and humidity chamber for cyclic wet-dry tests, along with methods such as SEM analysis, metallographic analysis, corrosion weight loss measurement, and electrochemical analysis, the corrosion resistance of coating-free high-strength and high-corrosion-resistant steel LG500EW, galvanized plain carbon steel Q235, and conventional low-alloy steel Q355B was investigated in a simulated industrial marine atmospheric environment. The results show that in such an environment, both LG500EW and galvanized Q235 exhibit better atmospheric corrosion resistance than conventional low-alloy Q355B. As the simulated accelerated test duration increases, the corrosion rate of galvanized Q235 continues to rise until corrosion occurs beneath the coating on the iron substrate. In contrast, with prolonged exposure, a protective rust layer gradually forms on LG500EW steel. The outermost rust layer develops a relatively dense and complete plate-like corrosion product layer, with a significant increase in the diffraction peak intensity of α -FeOOH in the corrosion products. The self-corrosion potential rises while the self-corrosion current decreases. After 32 days of corrosion, the corrosion thinning of LG500EW steel is 90 μm , approximately twice that of galvanized Q235 (40 μm), demonstrating excellent corrosion resistance. The environmentally friendly, coating-free, high-strength, and high-corrosion-resistant highway guardrail steel exhibits superior performance in

基金项目: 广西重点研发计划(桂科 AB25069481)

作者简介: 李 显(1990—),男,本科,高级工程师; E-mail: 646636483@qq.com; 收稿日期: 2025-09-19

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

industrial marine atmospheric environments compared to traditional guardrail steels. The developed steel has been successfully applied in coating-free highway guardrails, yielding significant economic, social, and ecological benefits.

Key Words: Coating-free; High-strength; High-corrosion-resistance; Highway Guardrail; Industrial Marine Atmospheric Environment; Alloy Design

公路护栏是保障道路交通安全的主要设施,广泛应用于各级公路。根据材料、结构以及变形特性的不同,公路护栏通常分为刚性护栏、半刚性护栏和柔性护栏,其中又以半刚性护栏应用最为广泛^[1-2]。半刚性护栏多采用普碳钢Q235经热浸镀锌处理后使用。普碳钢Q235由于强度低难以提供足够的防护,在大中型车辆碰撞事故中骑跨护栏甚至翻越护栏的情况时有发生。为此国内相关标准对不同等级护栏的厚度提出了严格要求,而这不仅加大了钢材用量,还增加了生产成本^[3-5]。此外,护栏零件加工成型后进行热浸镀锌处理,生产效率低、成本高,且镀锌过程会产生严重的环境污染,但国内公路护栏行业在免涂装护栏的应用方面没有成熟案例,亟待在该领域能有新突破。

在国家“双碳”背景下大力研发免涂装高强高耐蚀钢铁材料是我国加快钢铁产业绿色低碳转型的重要方向,故而本文提出了一种环保型免涂装高强高耐蚀公路护栏用钢LG500EW,旨在通过高强减量化、高耐蚀免涂装的设计理念,解决传统护栏用钢的不足,降低全产业链的碳排放。结合国内外高强护栏的应用现状,本文重点研究了LG500EW的耐腐蚀性能,并成功将其应用于高速公路护栏,取得了显著的经济效益、社会效益和生态效益。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

采用免涂装高强高耐蚀护栏取代目前成熟应用的镀锌护栏在耐腐蚀方面的阻力较大,为强化对比性,将高强高耐蚀公路护栏用钢LG500EW,与目前应用最为广泛的镀锌普碳钢Q235护栏钢(简称为DXQ235)及常规低合金钢Q355B进行耐腐蚀对比试验,具体成分见表1。

高强高耐蚀公路护栏用钢LG500EW采用低C高Cr,微量Cu、Ni的成分设计。Cr通过氧化形成致

密的Cr₂O₃膜,可显著提高基体钝化能力^[6]。王建军等^[7]进行了海洋大气中暴露3年的耐候钢、碳钢表面锈层对比,在内锈层中检测到了Cr的大量富集,促进了内锈层α-FeOOH的生成。Zhang等^[8]认为Cr能部分取代铁锈中的Fe而形成α-Cr_xFe_{1-x}OOH,使锈层具有阳离子选择性,阻止Cl⁻对基体的侵蚀。Cu在锈层中富集形成CuO/Cu₂O纳米颗粒,填充锈层孔隙并降低其导电性,从而阻碍电化学反应的进行,提高耐均匀腐蚀性能^[9-10]。钢基体与表面二次析出的Cu产生阳极钝化效果。Cu与Cr的协同作用可形成(Cr,Cu)-FeOOH复合锈层,进一步抑制SO₄²⁻和Cl⁻的侵蚀^[11]。Ni的2价氧化物存在于锈层尖晶石结构氧化物(即Fe₂NiO₄)中,提高锈层电阻,在高盐环境服役的耐候钢中加Ni还有利于形成致密锈层,阻止锈层中酸的形成、有效抑制Cl⁻的侵入^[12]。

高强高耐蚀公路护栏用钢LG500EW通过匹配TMCP轧制工艺,保证材料的耐蚀性和成形性。LG500EW典型TMCP生产工艺见表2。LG500EW钢的实际抗拉强度可达到600 MPa级别,断后伸长率可达到25%,另外,对比样品中的DXQ235在终端用户处加工成零件后进行热浸镀锌处理,Q355B钢则为热轧态原始表面,具体性能见表3。

1.2 实验方法

根据金属材料腐蚀标准GB/T 6464—2008及前人研究^[13-15],干湿交替循环试验选用Weiss-Voetsch C4-180型高低温湿热试验机。参考典型的沿海工业大气气氛,将SO₂和Cl⁻沉降量(0.411、0.057 mg/100 cm²·d)放大40倍,进而配制NaCl+NaHSO₃溶液,NaCl和NaHSO₃的浓度分别为9.45和66.88 mg/mL。将溶液按20 μL/cm²预先沉积在试样表面并烘干,样品单面面积为48 cm²,之后以3 h为周期进行无浸入式干湿交替试验,每周期中干燥、润湿过程的温度和相对湿度分别为45℃、60%和

表1 实验钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of tested steels

序号	牌号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Ti	%
1	LG500EW	0.06	0.15	0.50	0.015	0.005	0.25~0.60	2.30~3.00	≤0.65	0.015	
2	DXQ235	0.18	0.15	0.20	0.017	0.007	-	-	-	-	
3	Q355B	0.17	0.10	0.35	0.017	0.005	-	-	-	0.045	

表 2 LG500EW 钢的典型 TMCP 生产工艺

Table 2 Typical TMCP parameters for LG500EW steel

连铸坯厚度/mm	加热温度/°C	粗轧/°C	中间坯厚度/mm	终轧温度/°C	卷取温度/°C
230	1 220	1 050	40	860	600

表 3 实验钢的力学性能

Table 3 Mechanical properties of experimental steels

序号	牌号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
1	LG500EW	503	612	25
2	DXQ235	341	454	31
3	Q355B	445	561	26

30 °C、90% 干燥、湿润时间分别为 2 h 和 1 h, 试验周期为 4、8、16、24、32 天。每周期结束后, 对试样进行腐蚀试样表面 SEM 分析、腐蚀失重测量、腐蚀产物 XRD 分析和腐蚀试样电化学分析。采用 XL30FEG 型扫描电子显微镜 (SEM) 对腐蚀试样的微观形貌进行观察和分析; 根据国家标准 GB/T 16545—2015 中的化学法去除试样表面腐蚀产物并进行腐蚀失重测量; 采用 Rigaku-D/max-2500PC 型衍射仪, 铜 K α 靶, 在 50 kV—250 mA 条件下, $2\theta = 10^\circ \sim 90^\circ$ 范围内以

$2^\circ/\text{min}$ 的扫描速度对腐蚀产物进行 XRD 分析; 采用 Gamry 电化学工作站和三电极体系来测定极化曲线, 其中饱和 KCl 甘汞电极 (SCE) 为参比电极, Pt 电极为对电极, 工作电极为待测试样。

2 实验结果与分析

2.1 腐蚀宏观形貌

图 1 为三种实验材料在不同腐蚀周期后的宏观腐蚀形貌。由图 1(a) 可知, 在整个模拟加速试验过程中, 镀锌普碳钢 DXQ235 以锌的腐蚀迁变为主, 形成了严重的局部腐蚀行为。在第二周期时出现黑色腐蚀产物, 随着试验时间延长, 镀锌钢表面被白色腐蚀产物层覆盖。在腐蚀进行到 32 天时, 镀锌钢表面出现红锈, 此时表面锌层被腐蚀穿透, 镀锌钢基体中铁参与到腐蚀过程中。图 1(b) 和图 1(c) 为 LG500EW 和 Q355B 两种钢材不同腐蚀周期下的宏观形貌。可以看出, 在这个腐蚀过程中, 两种钢材均以铁的腐蚀行为为主。最外锈层随着腐蚀时间的延长进行着反复生长与脱落的过程, 在此过程中, 图 1(b) 中 LG500EW 钢的最外层锈层较致密, 并且同一周期下, LG500EW 钢的最外层锈层完整性要

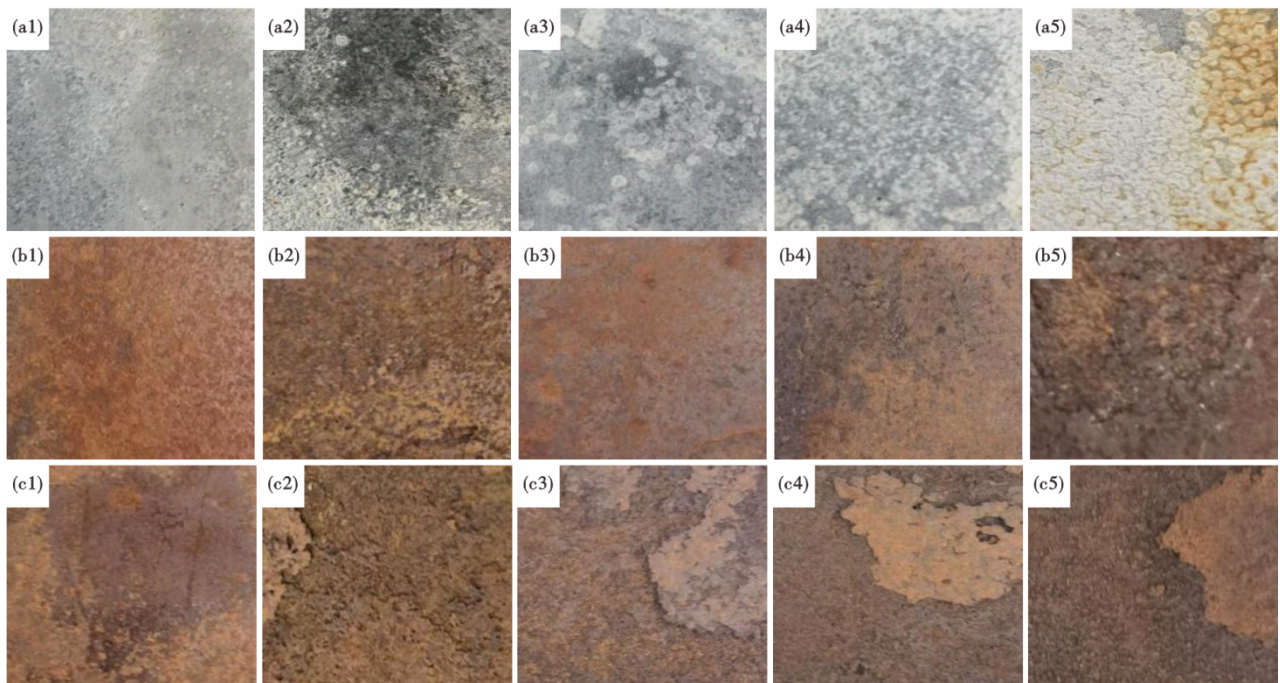


图 1 试验钢在模拟工业海洋性大气环境中不同腐蚀周期宏观形貌: 镀锌普碳钢 DXQ235 腐蚀 (a1) 4 天, (a2) 8 天, (a3) 16 天, (a4) 24 天, (a5) 32 天; 耐候钢 LG500EW 腐蚀 (b1) 4 天, (b2) 8 天, (b3) 16 天, (b4) 24 天, (b5) 32 天; 低合金钢 Q355B 腐蚀 (c1) 4 天, (c2) 8 天, (c3) 16 天, (c4) 24 天, (c5) 32 天

Fig. 1 The macroscopic morphology of the tested steel at different corrosion cycles in the simulated industrial marine atmospheric environment; Galvanized plain carbon steel DXQ235 corrosion (a1) 4 days, (a2) 8 days, (a3) 16 days, (a4) 24 days, (a5) 32; Weathering steel LG500EW corrosion (b1) 4 days, 8 days (b2), (b3) 16 days, (b4) 24 days, (b5) 32 days; Corrosion of low alloy steel Q355B: (c1) 4 days, (c2) 8 days, (c3) 16 days, (c4) 24 days, (c5) 32 days

远远高于Q355B钢。

2.2 腐蚀微观形貌

对三种实验材料各阶段进行SEM扫描电镜分析,选取典型的第16天、第32天样品进行对比。

图2为镀锌普碳钢DXQ235腐蚀形貌,表面以点蚀为主。在整个腐蚀过程中,这种点蚀为主的锈层由于大孔隙率的存在使得镀锌层与腐蚀因子直接接触,使镀锌钢一直处于腐蚀加速过程。图3为LG500EW钢的腐蚀形貌,可以看出,LG500EW钢在短时间内形成了板甲状的腐蚀产物层。当板甲状腐蚀产物层处于最外层时,可以阻止腐蚀因子与金属基体接触,使腐蚀速率下降。图4为Q355B钢的

腐蚀形貌图,结合宏观形貌可以看出在整个模拟加速试验过程中,Q355B钢未形成相对稳定的最外层锈层,金属基体始终受到腐蚀因子的直接影响。锈层的表面存在大缝隙形貌。因此,在整个腐蚀过程中Q355B钢的腐蚀速率要高于LG500EW钢。

2.3 腐蚀后失重对比

周期试验结束后根据国家标准GB/T 16545—2015中的化学法去除试样表面腐蚀产物。其中镀锌普碳钢DXQ235试样采用10%(质量分数)的 NH_4Cl 溶液在70℃浸泡2~5 min去除表面腐蚀产物;LG500EW钢和Q355B钢试样采用500 mL浓盐酸+500 mL蒸馏水+3.5 g 六次甲基四胺的自制除锈

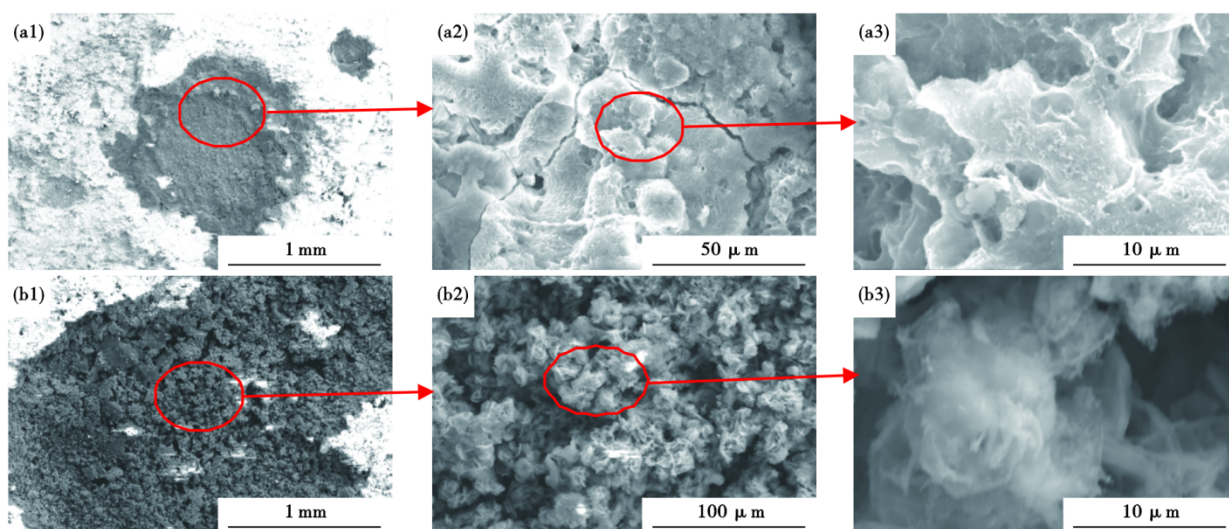


图2 DXQ235钢模拟加速实验微观形貌:第三周期(a1)50×,(a2)500×,(a3)5000×;第五周期(b1)50×,(b2)500×,(b3)5000×
TFig. 2 The microscopic morphology of DXQ235 simulation accelerated experiment: in the third cycle, (a1)50×, (a2)500×, (a3)5000×;The fifth cycle, (b1)50×, (b2)500×, (b3)5000×

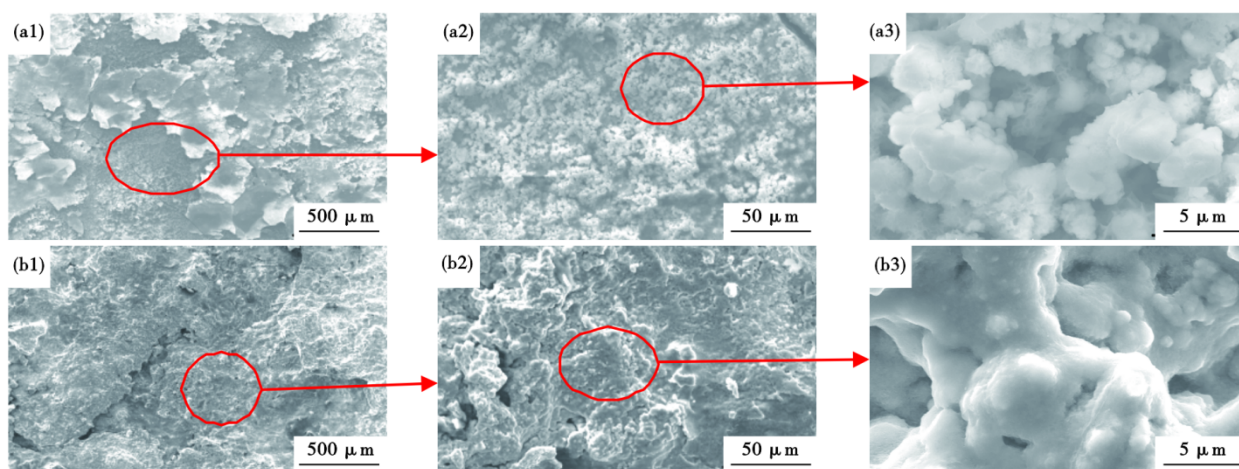


图3 LG500EW钢模拟加速实验微观形貌:第三周期(a1)50×,(a2)500×,(a3)5000×;第五周期(b1)50×,(b2)500×,(b3)5000×
Fig. 3 Microscopic morphology of LG500EW simulation accelerated experiment : in the third cycle (a1)50×, (a2)500×, (a3)5000×; The Fifth cycle (b1)50×, (b2)500×, (b3)5000×

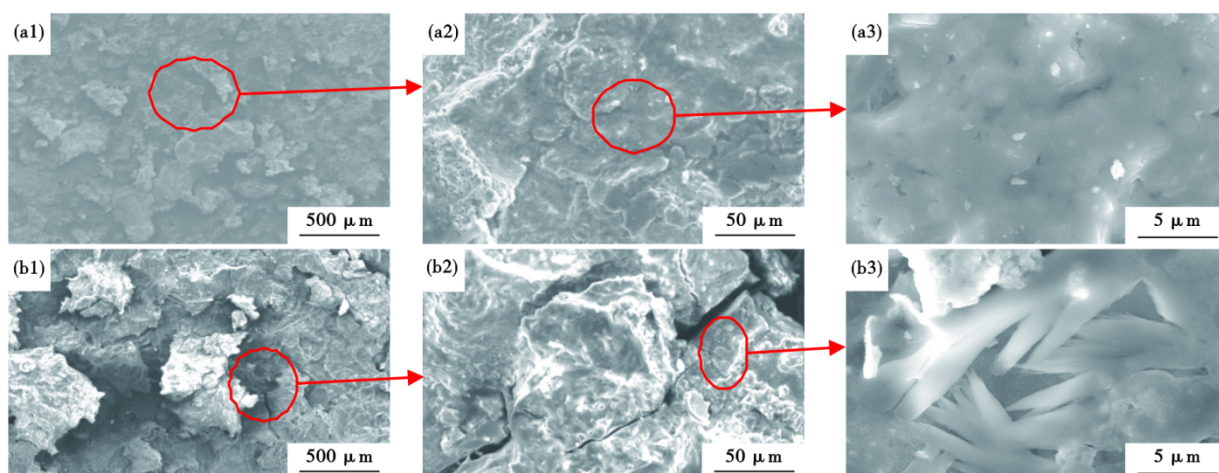


图4 Q355B钢模拟加速实验微观形貌:第三周期(a1)50×,(a2)500×,(a3)5000×;第五周期(b1)50×,(b2)500×(b3)5000×
Fig. 4 Microscopic morphology of Q355B simulation accelerated test : In the third cycle, (a1)50×, (a2)500×, (a3)5000×; The Fifth cycle (b1)50×, (b2)500×, (b3)5000×

液在 20 ~ 25 °C 浸泡 10 min 去除表面腐蚀产物。除锈后的试样经水洗、酒精脱水、吹干后放入干燥器皿中,24 h 后取出称重,每组取三片平行试样。利用式(1)将质量损失数据换算成腐蚀减薄量,即

$$D = 10000Wt / \rho A \quad (1)$$

式中, D 是腐蚀减薄量, μm ; Wt 是质量损失, g ; ρ 是密度(DXQ235 为 7.14 g/cm^3 、LG500EW 钢和 Q355B 钢为 7.86 g/cm^3); A 是平板试样单面面积, 48 cm^2 。测定结果如图 5 所示。

由图 5 可知在整个模拟加速试验过程中,镀锌普碳钢 DXQ235、LG500EW 钢和 Q355B 钢的腐蚀减薄量随着腐蚀时间增加呈持续增加的关系。由于镀锌普碳钢 DXQ235 的腐蚀是以镀锌层的腐蚀行为为主,所以其腐蚀减薄量小于 LG500EW 钢和 Q355B 钢两种钢材腐蚀失重,但 DXQ235 的腐蚀速度在逐步提高,在腐蚀 32 天后,锌层已被锈穿,此后将进入普碳钢的快速腐蚀阶段。而在模拟加速试验全周期内, LG500EW 钢腐蚀减薄量都小于 Q355B 钢,且 LG500EW 钢的腐蚀速率在第二周期时开始逐步减慢,最终趋于平缓。Q355B 钢的腐蚀速率则一直保持在较高水平。腐蚀 32 天后, LG500EW 钢的腐蚀减薄量为 $90 \mu\text{m}$,接近 DXQ235 的腐蚀减薄量 $40 \mu\text{m}$ 的 2 倍,显示出优异的耐蚀性能。

2.4 XRD 分析

对镀锌普碳钢 DXQ235 腐蚀产物进行 XRD 分析,如图 6 所示,锌层在干湿交替的腐蚀过程中主要为锌层腐蚀溶解的阳极反应、氧气在锌层表面还原的阴极反应。结合表面形貌和截面分析,腐蚀前期

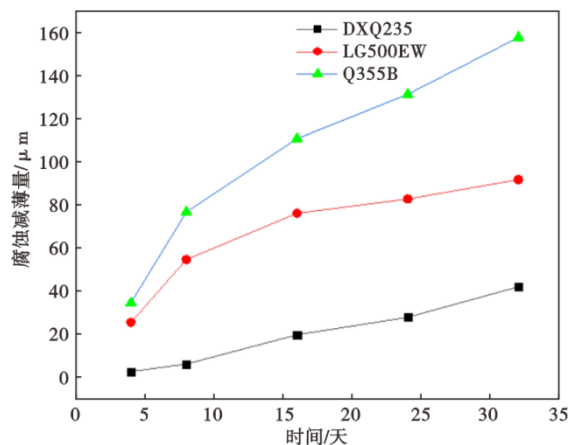


图5 DXQ235、LG500EW 和 Q355B 钢在模拟工业海洋性大气环境中腐蚀厚度减薄对比

Fig. 5 Comparison of corrosion thinning of DXQ235, LG500EW and Q355B steel in simulated industrial marine atmospheric environment

锌层表面的腐蚀产物较致密,对 O_2 的扩散阻碍作用很大,锌层的耐蚀性较强。随着腐蚀的进行,腐蚀介质中 Cl^- 和 HSO_3^- 不断与氧化膜反应并在氧化膜表面缺陷处吸附,形成暂态中间化合物 $\text{NaZn}_4(\text{SO}_4)\text{Cl}(\text{OH})_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 。另外 SO_4^{2-} 和 Cl^- 不断参与反应,使局部区域离子浓度的配比发生变化,生成了与第一阶段不同的水溶性产物,对 O_2 的扩散阻碍作用降低,使得锌层的耐蚀性逐渐减弱。随着反应的进行中间化合物特征峰开始减弱,在腐蚀进行 32 天后,稳定态化合物 ZnO 峰值增强^[15]。

而 LG500EW 钢和 Q355B 钢在模拟加速试验中不同周期的主要腐蚀产物为 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ 和 Fe_3O_4 ,如图 7-8 所示。 Cl^- 和 HSO_3^- 协同作用,将锈

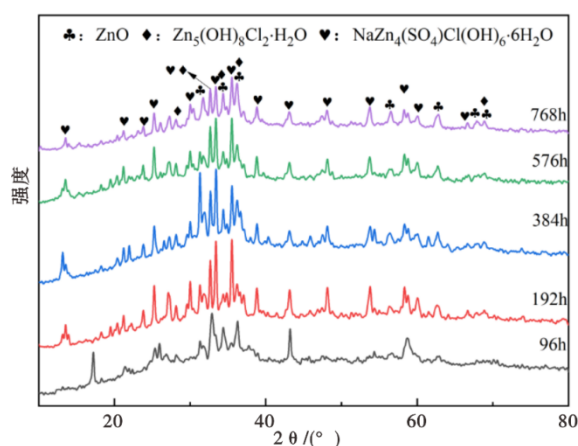


图6 DXQ235钢腐蚀不同时间的XRD谱

Fig. 6 XRD spectrum of DXQ235 steel at different corrosion time

层中Fe的氧化产物分解,生成了 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$,在pH=6~8的条件下水解得 $\alpha\text{-FeOOH}$ 和 $\gamma\text{-FeOOH}$ ^[16]。随着腐蚀时间的增加,腐蚀产物从化学性质活跃的 $\gamma\text{-FeOOH}$ 和非晶态的 Fe_3O_4 转变为电化学稳定性好的 $\alpha\text{-FeOOH}$ 。LG500EW腐蚀产物中 $\alpha\text{-FeOOH}$ 的衍射峰强度随着腐蚀时间的增加明显升高,说明LG500EW钢随着腐蚀时间增长,保护性锈层逐渐生成,腐蚀速率逐渐下降,锈层更稳定。

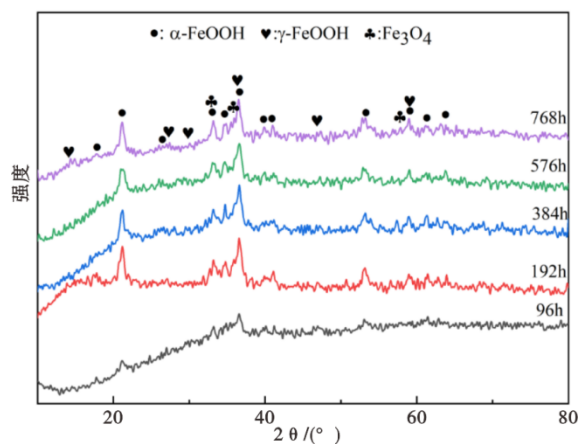


图7 LG500EW钢W腐蚀不同时间的XRD谱

Fig. 7 XRD spectrum of LG500EW steel at different corrosion times

2.5 电化学分析

金属腐蚀的实质是发生在薄液膜下的电化学反应,腐蚀电流密度的大小直接反映了腐蚀反应进行的速率快慢。图9(a)为镀锌普碳钢DXQ235在模拟沿海工业大气中腐蚀不同时间后的极化曲线:腐蚀第一周期(96 h)、腐蚀第二周期(192 h)、腐蚀第

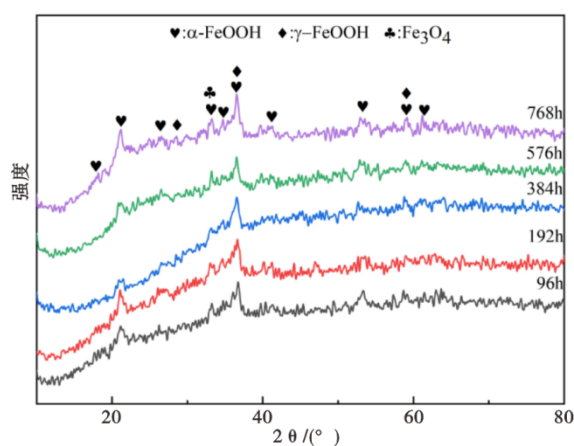


图8 Q355B钢腐蚀不同时间的XRD谱

Fig. 8 XRD spectrum of Q355B steel at different corrosion time

三周期(384 h)、腐蚀第四周期(576 h)和腐蚀第五周期(768 h)。从图9中可以看出,随着腐蚀时间增加极化曲线阳极极化曲线向右偏移,即处于氧的扩散过程,此时镀锌钢锈层电化学性质在模拟加速试验环境中处于加速溶解过程。

图9(b)是LG500EW钢腐蚀的极化曲线图,随着腐蚀时间增加,腐蚀产物在电极表面长时间累积,由于Cr、Cu等合金元素的作用使腐蚀层趋于致密,可以降低锈层电导率,加速 Fe^{2+} 向 Fe^{3+} 的转化,促进锈层中 $\alpha\text{-FeOOH}$ 的增加,从而阻碍侵蚀性离子从溶液向基体的扩散和腐蚀产物向溶液的扩散,对基体具有一定的保护能力^[17]。对比图9(c)的Q355B钢腐蚀的极化曲线图,可见随着腐蚀时间的延长,LG500EW钢的自腐蚀电位上升,自腐蚀电流降低,表现出更好的耐腐蚀性。

2.6 实验讨论

环保型免涂装高强高耐蚀公路护栏用钢LG500EW通过低C高Cr的成分设计,同时,添加一定量的Cu、Ni,以保证材料的耐蚀性和成形性的匹配。通过Cr、Cu、Ni的协同作用,显著提升了在工业海洋性大气环境中的耐蚀性。结合高强高耐蚀公路护栏用钢LG500EW,镀锌普碳钢Q235护栏钢及常规低合金钢Q355B的耐腐蚀对比试验,可以看出:在工业海洋性大气腐蚀环境中,高强高耐蚀公路护栏用钢LG500EW,镀锌普碳钢Q235护栏钢的耐大气腐蚀性能都优于常规低合金钢Q355B。而随着模拟加速试验时间延长,镀锌普碳钢Q235一直处于腐蚀加速过程,其耐蚀性并未随腐蚀时间增加而提升。相反LG500EW钢随着模拟加速试验时间延

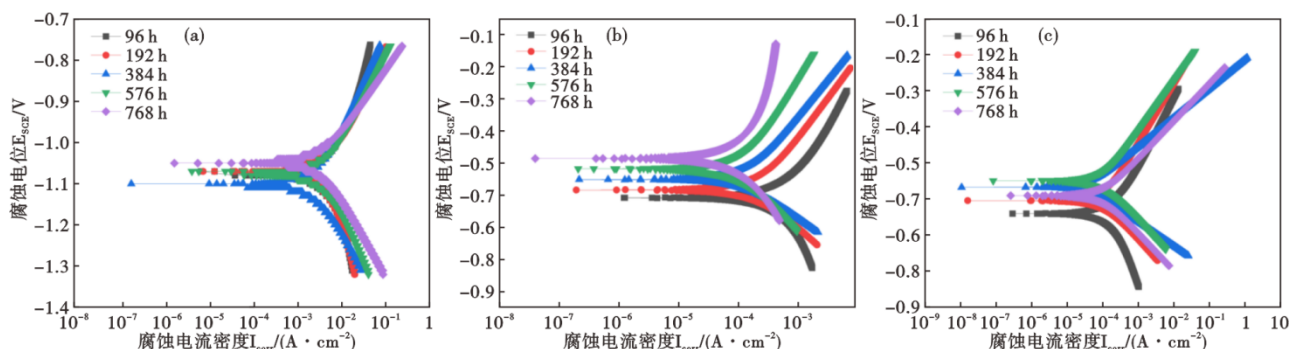


图9 试验钢在不同腐蚀周期的极化曲线:(a)镀锌普碳钢DXQ235,(b)耐候钢LG500EW,(c)低合金钢Q355B

Fig. 9 Polarization curves of test steel at different corrosion cycles : (a) Galvanized common carbon steel DXQ235, (b) weathering steel LG500EW, (c) low alloy steel Q355B

长,其耐蚀性持续增加。通过分析发现, LG500EW 钢表面锈层结构和化学稳定性都对 Cl^- 和 HSO_3^- 有较高的阻碍作用,能够对金属基体形成有效保护。而镀锌 Q235 钢表面锈层在 Cl^- 和 HSO_3^- 协同影响下,形成大孔隙结构,并且锈层中化学性质活泼的中间产物反复生产,加重金属基体腐蚀。在腐蚀后期,镀锌 Q235 钢表面镀锌层由于锌铁共晶相的沿晶腐蚀达到了镀层下铁基体的腐蚀行为,失去保护性作用。

目前柳钢已初步形成环保型免涂装高强高耐蚀公路护栏用钢的供货及应用,如图 10 所示,属于国内耐候公路护栏的首批次应用。有效解决了传统公路护栏用钢 Q235 强度低、耐蚀性差、镀锌处理环境污染严重等问题,降低全产业链的碳排放,具有显著的经济效益、社会效益和生态效益。

3 结论

环保型免涂装高强高耐蚀公路护栏用钢 LG500EW 采用低 C 高 Cr, 微量 Cu、Ni 的成分设计,匹配 TMCP 轧制工艺,保证耐蚀性和成形性,产品实际抗拉强度可达到 600 MPa 级别。在工业海洋性大气腐蚀环境中,高强高耐蚀公路护栏用钢 LG500EW, 镀锌普碳钢 Q235 护栏钢的耐大气腐蚀性能都优于常规低合金钢 Q355B。随着模拟加速试验时间的延长,镀锌普碳钢 Q235 钢一直处于腐蚀加速过



图 10 环保型免涂装高强高耐蚀公路护栏应用实例

Fig. 10 Application Examples of Eco-Friendly, Coating-free High-Strength, and High-Corrosion-Resistant Highway Guardrails

程,其耐蚀性并未随腐蚀时间增加而提升,直至达到镀层下铁基体的腐蚀行为,相反 LG500EW 钢随着腐蚀时间增长,保护性锈层逐渐生成,最外层锈层形成了较致密且完整的板甲状腐蚀产物层,腐蚀产物中 $\alpha\text{-FeOOH}$ 的衍射峰强度明显升高,自腐蚀电位上升,自腐蚀电流降低,腐蚀 32 天后, LG500EW 钢的腐蚀减薄量为 90 μm ,接近镀锌普碳钢 Q235 腐蚀减薄量 40 μm 的 2 倍,显示出优异的耐蚀性能。该研究成果已成功应用于免涂装公路护栏,降低全产业链的碳排放,具有显著的经济效益、社会效益和生态效益。

参考文献

- [1] 彭德清. 汽车安全气囊误用的测试方法研究[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [2] 谢玉洪,雷正保,李海侠,等. 高速公路防撞护栏的研究现状与发展趋势[J]. 工程建设与设计,2003,(12):40-43.
- [3] 刘峰良. 高强钢波形梁护栏碰撞安全性和耐蚀性能研究[D]. 济南:山东建筑大学,2021.
- [4] 伊政. 高速公路波形梁护栏碰撞仿真研究及其优化[D]. 长

沙:湖南大学,2014.

- [5] 柳佳. 高速公路车辆碰撞能量与护栏等级的研究[J]. 北方交通,2020,(7):75-77.
- [6] 赵平,苍大强,黄运华,等. 低合金高强度耐候钢 Corten Cr2 的耐腐蚀性[J]. 特殊钢,2012,33(2):51-54.
- [7] 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,(7):288-291.

[8] Zhang Q C, Wu J S, Wang J J, et al. Corrosion behavior of weathering steel in marine atmosphere. *Materials Chemistry & Physics*, 2003, 77(2):603-608.

[9] 郝献超,肖 葵,张汉青,等. 模拟海洋大气环境下 Cu 和 Cr 对耐候钢耐腐蚀性能的影响[J]. *材料保护*, 2009, 42(1):21-23+43+90.

[10] 李 阳,陈常勇,方 勇,等. Cu 对含 Sn 铁素体不锈钢的力学及耐腐蚀性能的影响[J]. *特殊钢*, 2024, 45(3):49-55.

[11] 封 辉,刘 峰,王本贤,等. Cu 和 Cr 对耐候钢的力学性能及耐蚀性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2012, 33(1):110-116.

[12] 周鲁军,杨善武. 海洋工程用钢的大气腐蚀与耐候钢的发展[J]. *中国冶金*, 2022, 32(8):7-24.

[13] 米丰毅. 稀土对低碳结构钢耐工业及海洋大气腐蚀性能的影响研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2011.

[14] 黄 涛. 耐候钢在南海海洋大气环境下的腐蚀行为研究[D]. 北京:钢铁研究总院, 2018.

[15] 刘雨薇,尹 奇,王振尧,等. 热镀锌层在模拟沿海工业大气环境中的腐蚀行为[J]. *焊接学报*, 2018, 39(5):87-91+133.

[16] 曹公望,刘雨薇,张丹丹,等. Q235 和 Q345 钢在红沿河大气环境中的腐蚀行为[J]. *腐蚀与防护*, 2018, 39(1):24-28+34.

[17] 杨仲年. 耐候钢和 Zn 与 Zn-Fe 合金镀层的腐蚀电化学行为研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.

版 权 声 明

根据《中华人民共和国著作权法》,作者向《特殊钢》编辑部投稿(或接受约稿),全体作者同意,上述提交本刊发表的作品一经本刊录用,作者即将作品整体以及附属于作品的图、表、摘要或其他可以从作品中提取部分的全部版权——包括但不限于复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权、改编权,在著作权保护期内转让给《特殊钢》编辑部。本刊所付一次性稿酬已包含上述各种稿酬,若编辑部再以任何形式在任何地点出版该论文,将不再支付作者稿酬。

作者应保证论文是作者独立创作的原创性作品,未曾发表;不涉及侵权和泄密问题;保证论文没有一稿多投;保证论文的署名权无争议,若发生问题,一切责任由作者承担,文责自负。

如有异议,请在投稿前说明,本刊即时处理。