

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.03.013

## 镀锌钢和 Q235 钢在高氯盐环境中腐蚀行为对比

王宗江, 何成, 阿依古扎力·阿肯江, 穆合塔江·伊斯马伊力, 刘继颜

(国网新疆电力有限公司 电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 在对若羌地区某处土壤理化测试基础上, 对镀锌钢和 Q235 碳钢进行了不同 pH 值和 Cl<sup>-</sup>浓度的水溶液加速腐蚀实验, 对比研究了镀锌钢和 Q235 碳钢在高氯盐环境中的腐蚀行为。镀锌钢和 Q235 钢在酸性 Cl<sup>-</sup>环境下的自腐蚀电流均比在碱性 Cl<sup>-</sup>环境中的大, pH 值为 1 时自腐蚀电流分别为  $2.51 \times 10^{-4}$  和  $5.01 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>, pH 值为 11 时自腐蚀电流分别为  $1.99 \times 10^{-6}$  和  $5.12 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>。随 Cl<sup>-</sup>浓度增加, 镀锌钢和 Q235 钢的自腐蚀电位降低, 自腐蚀电流密度增加。在碱性 Cl<sup>-</sup>环境中镀锌钢比 Q235 钢具有更优的耐蚀性, 而在酸性环境下镀锌钢耐蚀性反而比 Q235 钢更差, pH 值=1 的 10% NaCl 水溶液中 Q235 钢腐蚀失重为 50.3 mg, 镀锌钢腐蚀失重达 120.2 mg。在 pH 值<7 时镀锌钢腐蚀产物为 ZnCl<sub>2</sub>, Q235 钢腐蚀产物为 FeCl<sub>3</sub>, 在 pH 值<7 时镀锌钢腐蚀产物为以 ZnO、Zn(OH)<sub>2</sub> 为主, Q235 钢腐蚀产物为  $\gamma$ -FeOOH。

**关键词:** Q235 钢; 镀锌钢; pH 值; 腐蚀

中图分类号: TG172; TQ153.3

文献标志码: A

## Comparison of corrosion behavior of galvanized steel and Q235 steel in high chloride environment

WANG Zongjiang, HE Cheng, AYGUZALI Arkanjiang, MUHTAJIANG Ismaili, LIU Jiyan

(Electric Power Science Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

**Abstract:** Based on the physical and chemical tests of the soil in Ruoqiang area, the accelerated corrosion experiments of galvanized steel and Q235 carbon steel in aqueous solution with different pH values and Cl<sup>-</sup> concentrations were carried out, and the corrosion behavior of galvanized steel and Q235 carbon steel in high chloride environment was compared. The results show that the self-corrosion current of galvanized steel and Q235 steel in acidic Cl<sup>-</sup> environment is larger than that in alkaline Cl<sup>-</sup> environment. The self-corrosion current is  $2.51 \times 10^{-4}$  and  $5.01 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup> at pH=1, and  $1.99 \times 10^{-6}$  and  $5.12 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup> at pH=11, respectively. With the increasing of Cl<sup>-</sup> concentration, the self-corrosion potential of galvanized steel and Q235 steel were decreased, and the self-corrosion current density was increased. In alkaline Cl<sup>-</sup> environment, galvanized steel has better corrosion resistance than Q235 steel, but the corrosion resistance of galvanized steel is worse than Q235 steel in acid environment. The corrosion weight loss of Q235 steel in 5% NaCl solution with pH=1 is 50.3 mg, which the corrosion weight loss of galvanized steel is 120.2 mg. When pH<7, the corrosion product of galvanized steel is ZnCl<sub>2</sub>, when the corrosion product of Q235 steel is FeCl<sub>3</sub>. With pH<7, the corrosion product of galvanized steel is mainly ZnO and Zn(OH)<sub>2</sub>, that the corrosion product of Q235 steel is  $\gamma$ -FeOOH.

**Keywords:** Q235 steel; galvanized steel; pH value; corrosion

收稿日期: 2025-08-06

修回日期: 2025-09-01

通信作者: 王宗江(1990—), 男, 硕士, 高工, 研究方向为材料腐蚀, e-mail: gwxj123456@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51864035)

引用信息: 王宗江, 何成, 阿依古扎力·阿肯江, 等. 镀锌钢和 Q235 钢在高氯盐环境中腐蚀行为对比[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(3): 100-106.

WANG Zongjiang, HE Cheng, AYGUZALI Arkanjiang, et al. Comparison of corrosion behavior of galvanized steel and Q235 steel in high chloride environment[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(3): 100-106.

接地网是变电站的重要组成设备,用于保证工作接地、保护接地、防雷接地,保护人身安全和设备安全,对电力系统安全具有举足轻重的作用<sup>[1]</sup>。目前常用接地材料主要有Q235碳钢、镀锌钢、铜包钢、铜等<sup>[2-5]</sup>。Q235碳钢和镀锌钢由于具有成本低廉、电气性能优异等特点,一直是我国用量最大的接地金属材料<sup>[6-10]</sup>。

接地网材料与土壤直接接触,土壤中的含盐量、含水量、含氧量、pH值等会对接地网Q235碳钢和镀锌钢的腐蚀速率产生显著的影响。近年来,国内外众多学者对在不同地区土壤环境中的镀锌钢和Q235碳钢的腐蚀行为开展了相关研究。例如,郑敏聪等<sup>[11]</sup>研究了镀锌钢接地材料在不同pH值酸化土壤中的腐蚀规律,发现镀锌钢在酸化土壤中的腐蚀过程主要由阴极过程控制,腐蚀速率随酸化溶液pH值增大而减小,随腐蚀时间延长先增大后减小。陈散兴等<sup>[12]</sup>认为镀锌钢在碱性土壤站中,腐蚀产物主要以碱性氯化锌和氯代碱式硫酸锌钠为主。王铁铮等<sup>[13]</sup>在对吉林地区暗棕土壤环境中镀锌钢腐蚀行为研究发现,土壤中的Cl<sup>-</sup>被吸附在镀锌钢表面促进腐蚀,腐蚀产物主要为Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、FeOOH和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。新疆地区土壤与内陆地区土壤类型不同,含氯盐为主的盐渍化是新疆地区土壤的典型特征,且不同区域的酸碱度和含氯盐渍化程度存在显著差别<sup>[14-15]</sup>。然而,关于接地网Q235碳钢和镀锌钢在新疆含氯盐环境下的腐蚀行为研究非常少。

本文的目的是在理化测试新疆若羌地区土壤含氯盐为主离子类型和含量的基础上,采用Cl<sup>-</sup>水溶液加速腐蚀方法对比研究不同Cl<sup>-</sup>浓度和pH值下镀锌钢和Q235钢电化学腐蚀行为,并通过静态浸泡研究Cl<sup>-</sup>浓度和pH值对镀锌钢和Q235钢腐蚀微观形貌、腐蚀失重的影响规律,为后续两种材料在实际新疆若羌地区土壤腐蚀行为研究提供参考。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验材料为接地网专用镀锌钢(基体为Q235钢)和Q235钢板。镀锌钢板截面微观组织如图1所示,可以看出,镀锌钢板镀锌层厚薄较均匀,厚度约为200 μm。为消除钢板表面污染对实验结果的影响,对镀锌钢和Q235钢板进行丙酮中超声波清洗,并烘干水分。

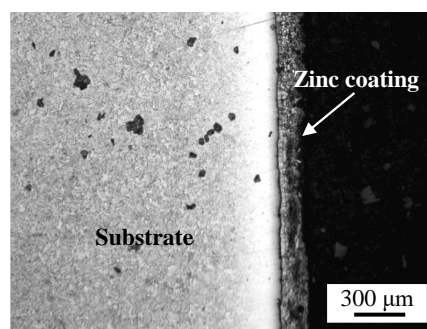


图1 镀锌钢板截面微观形貌

Fig.1 Microscopic morphology of galvanized steel plate section

### 1.2 实验方法

采集自新疆若羌地区某处输电铁塔附近1 m深处土壤,并采用理化测试土壤的离子类型和含量。理化测试标准均按“中华人民共和国农业行业标准LY/T 1251—1999”,理化测试结果如表1所示。从表1可看出,新疆若羌地区某处土壤Cl<sup>-</sup>浓度为0.904 mg/L、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度为0.056 mg/L。理化测试结果表明,土壤离子类型以Cl<sup>-</sup>为主,附加少量SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,土壤酸碱度为弱碱性。

表1 新疆若羌地区某处土壤理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of the soils in Ruoqiang area, Xinjiang

指标	方法	相关标准	结果
pH	电位法 (pH计)	HJ962—2018	7.5
Cl <sup>-</sup> 含量	滴定法	LY/T 1251—1999	0.904 mg/L
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 含量	分光光度法	LY/T 1251—1999	0.056 mg/L

为分析Cl<sup>-</sup>浓度和pH值对镀锌钢和Q235钢腐蚀行为,在理化测试结果基础上,配置Cl<sup>-</sup>浓度为1%~10%、pH值为1~11的水溶液,并进行镀锌钢和Q235钢板的动电位极化性能测试和浸泡实验。采用NaCl调配Cl<sup>-</sup>浓度,采用NaOH和HCl调配pH值。在CHI-660C腐蚀电化学测试系统上测试动电位极化曲线。电化学测试前60 min通过开路电位(OCP)时间曲线验证电极系统的稳态电位。之后对试样进行动电位极化曲线测试,电位扫描范围为-1.5~0.8 V,扫描速率为2 mV/s。将浸泡后试样利用超声波清洗腐蚀产物,之后称量浸泡前后试样重量之差表示腐蚀失重。采用KYKY-EM8100型扫描电镜进行腐蚀微观形貌SEM和EDS分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 动电位极化曲线

图2为不同pH值下镀锌钢和Q235钢在10% NaCl水溶液中的动电位极化曲线。根据图2中数据确定出不同pH值下镀锌钢和Q235钢自腐蚀电流密度和自腐蚀电位,如表2所示。从图2和表2可以看出,pH值对镀锌钢和Q235钢自腐蚀电流密度( $j$ )和自腐蚀电位( $E$ )均会产生影响。镀锌钢和Q235钢在酸性溶液中的自腐蚀电流均明显比在碱性溶液中的自腐蚀电流大。例如,镀锌钢和Q235钢pH值为1时自腐蚀电流分别为 $2.51 \times 10^{-4}$ 和 $5.01 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>,pH值为11时自腐蚀电流分别为 $1.99 \times 10^{-6}$ 和 $5.12 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>。此外,对比镀锌钢和Q235钢在相同pH值下的自腐蚀电流,在碱性Cl<sup>-</sup>环境下(pH值=11)镀锌钢比Q235钢具有更优的耐蚀性能,而在酸性Cl<sup>-</sup>环境下(pH值=1)镀锌钢的自腐蚀电流比Q235钢更大,镀锌钢的耐蚀性反而比Q235钢更差。

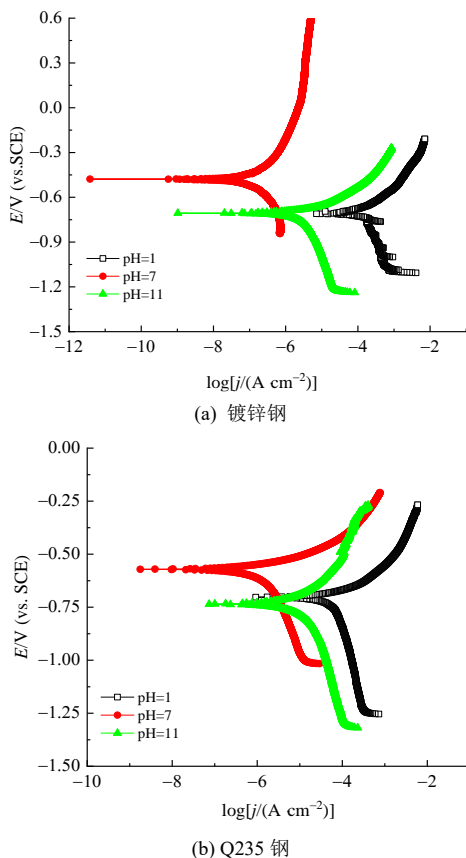


图2 不同pH值镀锌钢和Q235钢在10% NaCl水溶液中的动电位极化曲线

Fig.2 Potentiodynamic polarization curves of galvanized steel and Q235 steel in 10% NaCl solution with different pH values

表2 不同pH值10% NaCl水溶液中镀锌钢的自腐蚀电位和自腐蚀电流

Tab.2 Self corrosion potential and current of galvanized steel in 10% NaCl solution with different pH values

pH	镀锌钢		Q235 钢	
	$j/(A \cdot \text{cm}^{-2})$	$E/V$	$j/(A \cdot \text{cm}^{-2})$	$E/V$
1	$2.51 \times 10^{-4}$	-0.642 6	$5.01 \times 10^{-5}$	-0.702 9
7	$6.31 \times 10^{-8}$	-0.478 2	$7.94 \times 10^{-7}$	-0.571 5
11	$1.99 \times 10^{-6}$	-0.706 3	$5.12 \times 10^{-6}$	-0.735 9

图3为镀锌钢和Q235钢在不同Cl<sup>-</sup>浓度水溶液中的动电位极化曲线(pH=7)。根据图3中数据确定出镀锌钢和Q235钢在不同Cl<sup>-</sup>浓度溶液中的自腐蚀电流密度和自腐蚀电位,如表3所示。从图3和表3可以看出,Cl<sup>-</sup>浓度也会对镀锌钢和Q235钢的自腐蚀电位和自腐蚀电流密度产生影响。随Cl<sup>-</sup>浓度增加,镀锌钢和Q235钢的自腐蚀电位降低,自腐蚀电流密度增加。当Cl<sup>-</sup>浓度为2%时,镀锌钢和Q235钢的自腐蚀电位分别为-0.397 9和-0.602 1 V,自腐蚀电流

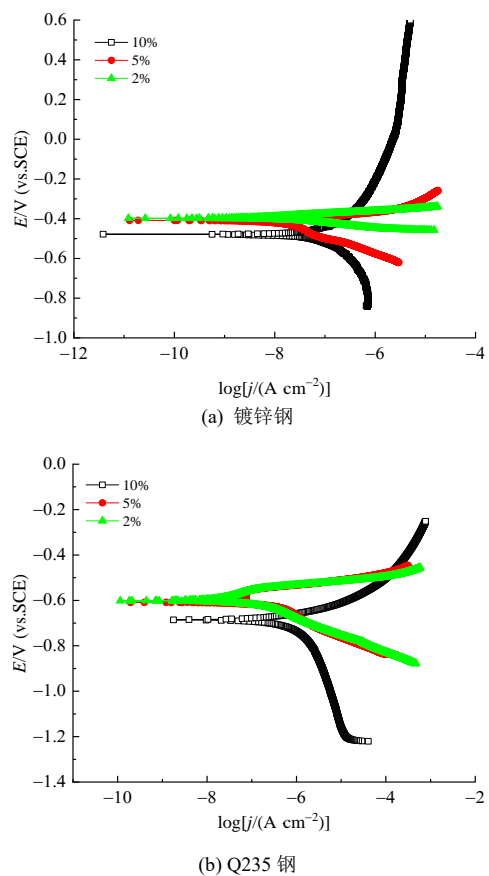


图3 镀锌钢和Q235钢在不同Cl<sup>-</sup>浓度水溶液中的极化曲线  
Fig.3 Polarization curves of galvanized steel and Q235 steel in aqueous solutions with different Cl<sup>-</sup> concentrations

密度分别为 $2.51 \times 10^{-8}$ 和 $7.59 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>。增加Cl<sup>-</sup>浓度至10%时,镀锌钢和Q235钢的自腐蚀电位分别为-0.478 2和-0.687 9 V,自腐蚀电流密度分别为 $5.25 \times 10^{-8}$ 和 $4.78 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup>。对比镀锌钢和Q235钢在中性相同Cl<sup>-</sup>浓度的自腐蚀电流,镀锌钢比Q235钢自腐蚀电流更小,说明镀锌钢比Q235钢具有更优的耐腐蚀性能。

表3 不同NaCl含量水溶液中镀锌钢的自腐蚀电位和自腐蚀电流 (pH=7)

Tab.3 Self corrosion potential and current of galvanized steel in aqueous solutions with different NaCl contents (pH=7)

NaCl 含量/%	镀锌钢		Q235 钢	
	$j/(A \cdot cm^{-2})$	$E/V$	$j/(A \cdot cm^{-2})$	$E/V$
2	$2.51 \times 10^{-8}$	-0.397 9	$7.59 \times 10^{-8}$	-0.602 1
5	$3.16 \times 10^{-8}$	-0.408 6	$7.94 \times 10^{-8}$	-0.608 7
10	$5.25 \times 10^{-8}$	-0.478 2	$4.78 \times 10^{-7}$	-0.687 9

## 2.2 Q235 钢和镀锌钢的腐蚀微观形貌

图4为镀锌钢和Q235钢在不同pH值10% NaCl溶液中浸泡36 h后的腐蚀微观形貌。从图4可看出,Q235钢在pH值为1的10% NaCl水溶液中以均匀腐蚀为主(见图4(a)),腐蚀微观形貌出现了大量凹凸不平特征,但仍能观察到少量腐蚀微孔,这是Cl<sup>-</sup>腐蚀的典型特征。镀锌钢在pH值为1的10% NaCl溶液中

腐蚀微观形貌同样存在大量腐蚀微孔(见图4(b)),出现严重腐蚀。整体而言,Q235钢在酸性10% NaCl水溶液中相比于镀锌钢,其腐蚀程度和腐蚀速率较低,也就是说,Q235钢热浸镀锌后在酸性Cl<sup>-</sup>溶液中的抗腐蚀能力反而变弱,并不能很好地起到腐蚀保护作用。当处于pH值为7的中性10% NaCl水溶液时,可以看出,Q235钢腐蚀微观表面上布满了大量腐蚀产物(见图4(c))。镀锌钢腐蚀微观形貌同样存在灰白色腐蚀产物(见图4(d)),在某些晶界区域还存在腐蚀微孔。相对来说,Q235钢在此种腐蚀环境下比镀锌钢腐蚀更为严重。这说明Cl<sup>-</sup>在Q235钢比在镀锌钢更严重地参与腐蚀。当pH值为11的强碱性10% NaCl水溶液时,Q235钢在腐蚀微观形貌上可观察到腐蚀产物斑点(见图4(e)),在腐蚀产物斑点周围出现连续的腐蚀微孔。相同腐蚀环境下的镀锌钢(见图4(f)),可观察到大量腐蚀微孔。整体而言,在强碱性10% NaCl水溶液时镀锌钢比Q235钢抗腐蚀能力强。

为分析Q235钢和镀锌钢在不同pH值10% NaCl水溶液中腐蚀产物组成,对相应腐蚀产物进行EDS成分分析,如图5所示。可以看出,在pH值=1的酸性10% NaCl水溶液中,Q235钢以Fe元素为主,存在少量O元素。因Q235钢酸性溶解形成的Fe<sup>3+</sup>与Cl<sup>-</sup>形成的FeCl<sub>3</sub>易溶于水,故未检测到Cl元素。镀锌钢在pH值=1酸性10% NaCl水溶液中,腐蚀产物EDS成分

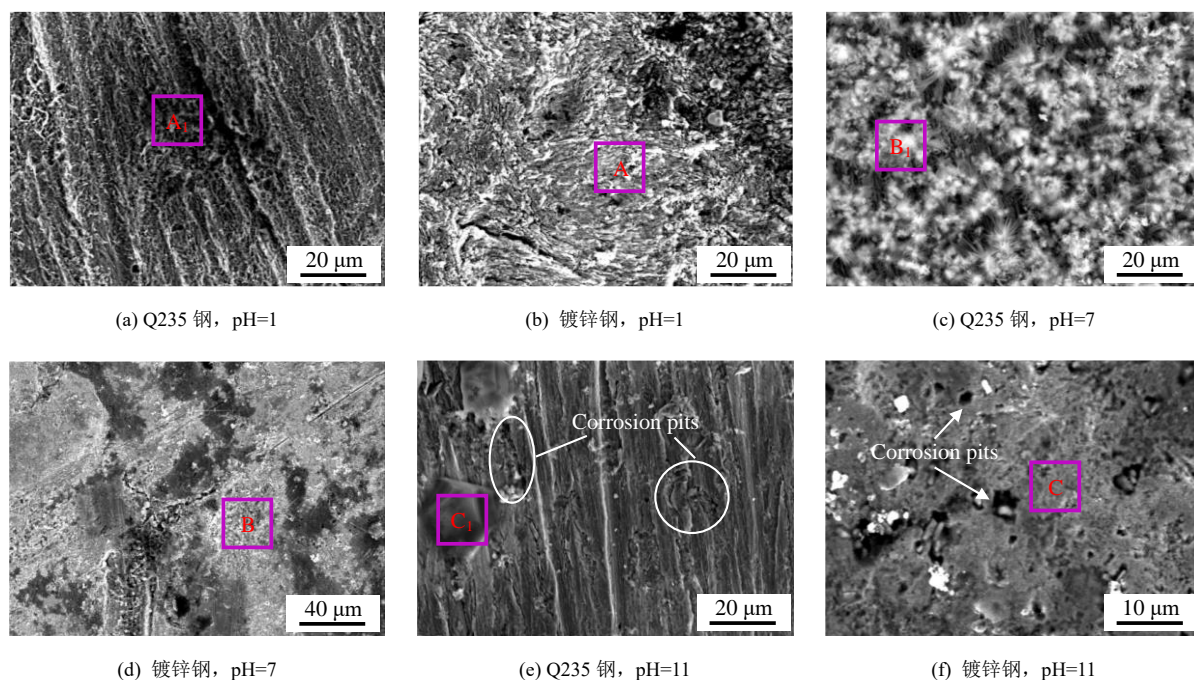


图4 pH值对Q235钢腐蚀微观形貌的影响(10%NaCl,浸泡36 h)

Fig.4 Effects of pH on the corrosion morphology of Q235 steel and galvanized steel(10% NaCl, soaking for 36 h)

中存在Fe、O元素为主和少量Zn, 说明镀锌钢的镀锌层基本被腐蚀。腐蚀产物ZnCl<sub>2</sub>易溶于水, 故也未检测到Cl元素。因而不不管是Q235钢还是镀锌钢在酸性10% NaCl水溶液中的抗腐蚀性能较差。当pH值为7的10% NaCl水溶液时, Q235钢的腐蚀产物主要由Fe和O元素组成(见图5(b))。文献表明<sup>[16]</sup>, 当pH值趋于中性或碱性时, Q235钢腐蚀产物主要为γ-FeOOH, 故可推断本实验条件下Q235钢腐蚀产物为γ-FeOOH。从图5(b<sub>1</sub>)可看出, 镀锌钢腐蚀产物主要由Zn和O元素组成。当中性溶液存在Cl<sup>-</sup>时, Cl<sup>-</sup>会渗透到镀锌钢表面, 发生如下的电化学腐蚀反应<sup>[17-18]</sup>:



ZnO和Zn(OH)<sub>2</sub>具有致密性, 对镀锌钢进一步腐蚀具有一定迟滞作用。本实验观察到灰白色腐蚀产物为以Zn的氧化物(ZnO、(Zn(OH)<sub>2</sub>)为主腐蚀产物<sup>[19]</sup>。继续增加pH值为11时的10% NaCl水溶液时, 对Q235钢腐蚀产物斑点进行EDS分析, 腐蚀产物斑点存在Na、Cl和Fe元素, 说明在腐蚀过程中存在NaCl吸附。而镀锌钢腐蚀产物仍然以Zn和O元素为主, 故应以为以Zn的氧化物(ZnO、Zn(OH)<sub>2</sub>)为主腐蚀产物。

图6为镀锌钢和Q235钢在10% NaCl水溶液中腐蚀微观形貌。从图6可看出, 镀锌钢和Q235钢在10% NaCl水溶液中的腐蚀微观形貌具有明显差别。从腐蚀产物致密度来看, Q235钢腐蚀产物疏松, 而镀锌钢的腐蚀产物较为致密, 说明在中性Cl<sup>-</sup>环境下镀锌钢比Q235钢具有更高的抗腐蚀能力, 这与动电位极化曲线的分析结果是相一致的。

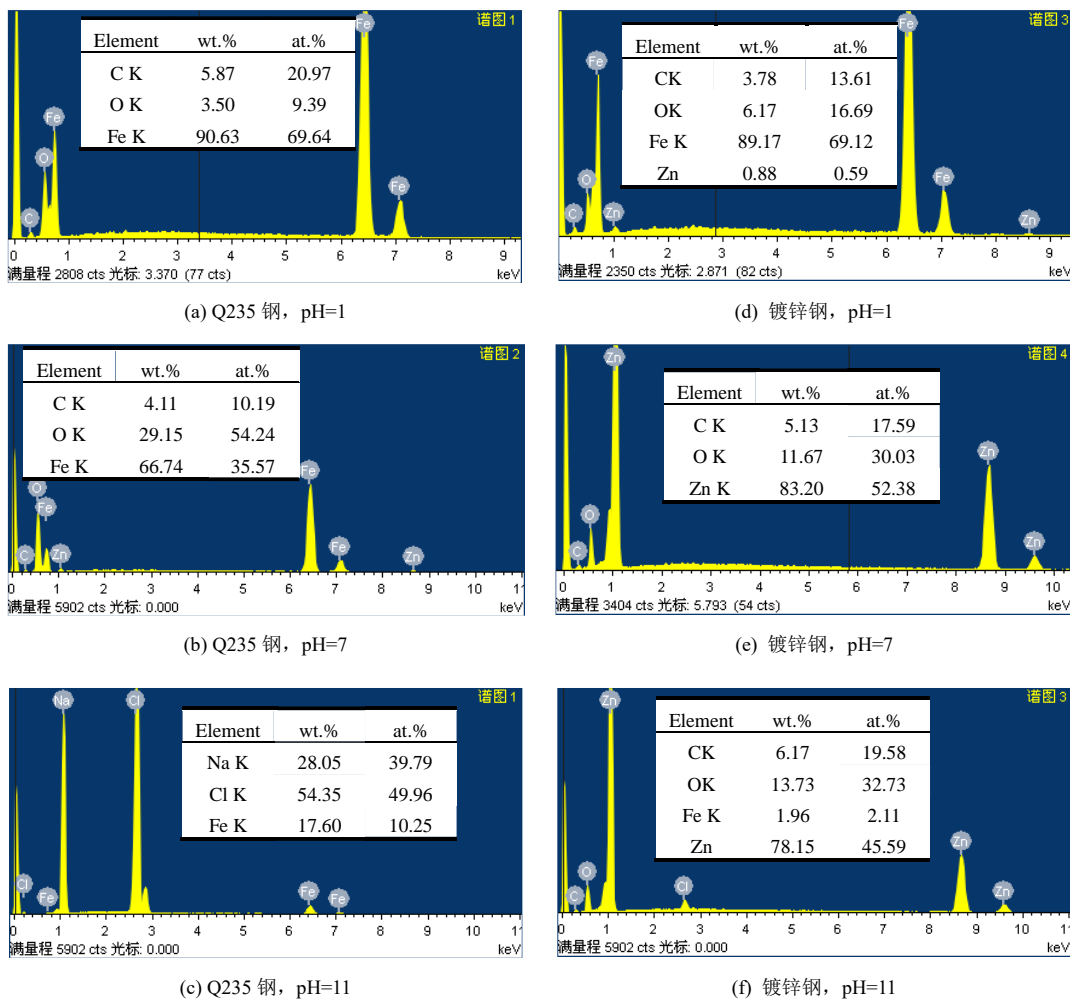


图5 pH值对镀锌钢和Q235钢腐蚀产物的成分的影响 (10%NaCl, 浸泡36h)

Fig.5 Effects of pH value on the composition of corrosion products of Q235 steel and galvanized steel (10% NaCl, immersion for 36 h)

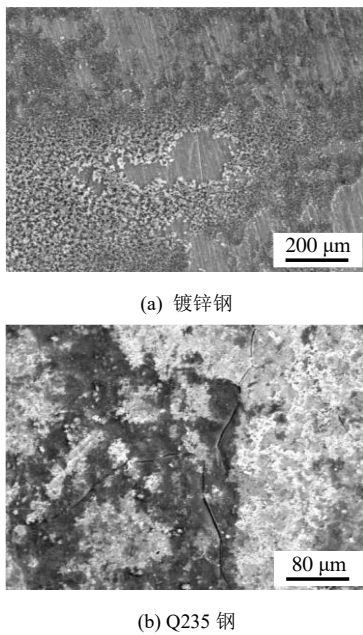


图6 镀锌钢和Q235钢在10% NaCl水溶液中腐蚀微观形貌(pH=7, 浸泡36 h)

Fig.6 Corrosion morphology of galvanized steel and Q235 steel in 10% NaCl aqueous solution (pH=7, immersion for 36 h)

### 2.3 Q235钢和镀锌钢的腐蚀失重

图7为pH值对镀锌钢和Q235钢腐蚀失重的影响。可以看出,在酸性(pH值<7)10%NaCl水溶液中镀锌钢和Q235钢腐蚀失重均比较大,腐蚀速率较快。而在碱性10%NaCl水溶液中镀锌钢和Q235钢腐蚀失重相对较小,腐蚀速率较慢。此外,在酸性10%NaCl水溶液中镀锌钢比Q235钢腐蚀失重更大,腐蚀速率更快。例如,在pH值=1的10%NaCl水溶液中镀锌钢浸泡16 d后腐蚀失重约为120.2 mg,相同条件下Q235钢腐蚀失重约为50.3 mg。值得注意的是,在碱性10%NaCl水溶液中镀锌钢却比Q235钢腐蚀失重更小,腐蚀速率更慢。例如,在pH=11的10%NaCl水溶液中镀锌钢浸泡16 d后腐蚀失重约为4.5 mg,相同条件下Q235钢腐蚀失重约为10.1 mg。

测量不同Cl<sup>-</sup>浓度下镀锌钢和Q235钢的腐蚀失重,如图8所示。从图8可看出,随Cl<sup>-</sup>浓度增加,镀锌钢和Q235钢腐蚀失重均增加,尤其是Cl<sup>-</sup>浓度超过8%后,腐蚀失重明显增加。文献表明<sup>[16-17]</sup>,Cl<sup>-</sup>能穿透钝化膜,促进金属材料局部腐蚀。从图8还可看出,在不同Cl<sup>-</sup>浓度下镀锌钢比Q235钢腐蚀失重更小,腐蚀速率更低。这说明在高Cl<sup>-</sup>浓度环境中,镀锌钢抗腐蚀能力强于Q235钢。尽管Cl<sup>-</sup>均能促进镀锌钢和Q235钢腐蚀,但镀锌钢形成的钝化膜能提供一定的腐蚀阻挡作用。

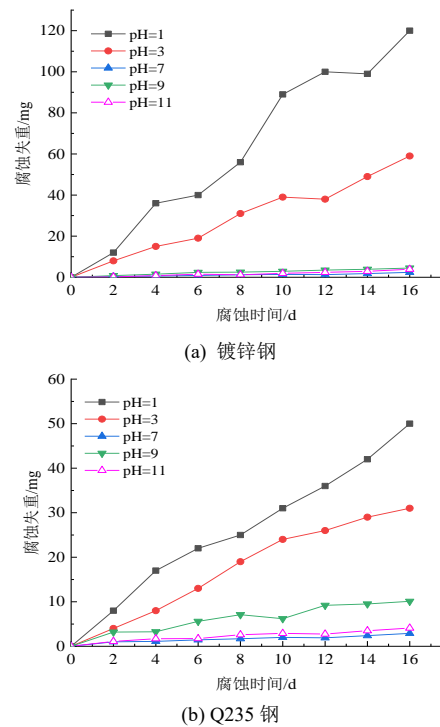


图7 pH值对镀锌钢和Q235钢腐蚀失重的影响(10% NaCl)  
Fig.7 Effects of pH value on corrosion weight loss of galvanized steel and Q235 steel (10% NaCl)

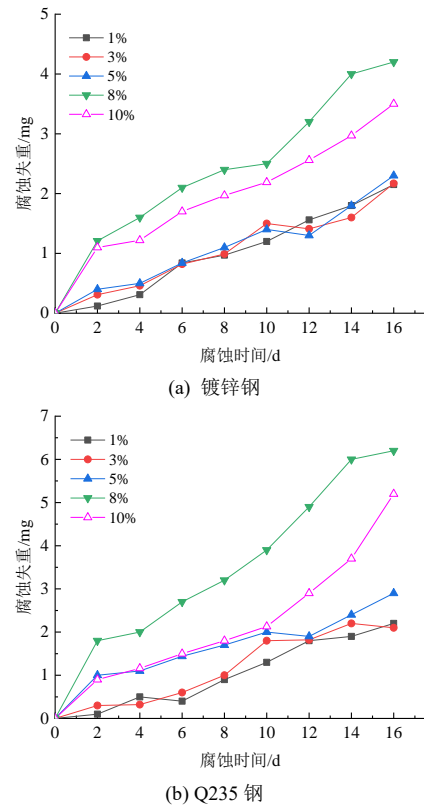


图8 Cl<sup>-</sup>浓度对镀锌钢和Q235钢腐蚀失重的影响(pH=7)  
Fig.8 Effects of Cl<sup>-</sup> concentration on corrosion weight loss of galvanized steel and Q235 steel (pH=7)

### 3 结论

(1) 镀锌钢和Q235钢在酸性溶液中的自腐蚀电流均比在碱性溶液中大, pH值为1时自腐蚀电流分别为 $2.51 \times 10^{-4}$ 和 $5.01 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>, pH值为11时自腐蚀电流分别为 $1.99 \times 10^{-6}$ 和 $5.12 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>。

(2) 随Cl<sup>-</sup>浓度增加, 镀锌钢和Q235钢的自腐蚀电位降低, 自腐蚀电流密度增加。镀锌钢在碱性Cl<sup>-</sup>环境下比Q235钢具有更优的耐蚀性, 而在酸性环境下镀锌钢耐蚀性反而比Q235钢更差。

(3) 在pH<7时镀锌钢腐蚀产物为ZnCl<sub>2</sub>, Q235钢腐蚀产物为FeCl<sub>3</sub>, 在pH<7时镀锌钢腐蚀产物为以ZnO、Zn(OH)<sub>2</sub>为主, Q235钢腐蚀产物为γ-FeOOH。

(4) 在酸性Cl<sup>-</sup>环境中镀锌钢比Q235钢腐蚀失重大, pH=1的10% NaCl水溶液中镀锌钢腐蚀失重为120.2 mg, Q235钢腐蚀失重为50.3 mg。

(5) 随Cl<sup>-</sup>浓度增加, 镀锌钢和Q235钢腐蚀失重均增加, 尤其是Cl<sup>-</sup>浓度超过8%后, 腐蚀失重明显增加。

### 参考文献

- [1] 林钟楷, 曹翔, 王震宇. 5种接地材料在汕头土壤模拟溶液中的腐蚀行为研究[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43(11): 114-120.
- [2] 周梦鑫, 王震宇. 四种接地材料在土壤中的氧浓差宏电池腐蚀行为[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44(3): 24-33.
- [3] HE C, WANG Z, YOU Y, et al. Influence of soil variability on the corrosion of buried hot-dip galvanized steel[J]. International Journal of Electrochemical Science. 2025, 20(1): 100889.
- [4] ZHU Z, SHI C, ZHANG Y, et al. The effects of Cl<sup>-</sup> and direct stray current on soil corrosion of three grounding grid materials[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials. 2020, 67(1): 73-82.
- [5] 边美华, 何雨茵, 彭家宁, 等. 镀锌钢耐腐蚀性能在线快速检测装置及其应用[J]. 电镀与涂饰. 2024, 43(7): 85-91.
- [6] 朱亦晨, 刘光明, 刘欣, 等. Q235钢在3种典型土壤环境中的腐蚀行为[J]. 机械工程材料, 2019, 43(10): 15-19.
- [7] 姚鑫, 陈昊, 周学杰, 等. Q235钢和热镀锌钢在棕壤土壤环境中的腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2024, 57(10): 59-67.
- [8] 卢云深, 祝志祥, 韩钰, 等. 5种接地金属材料在北方碱性黄土中的腐蚀行为[J]. 材料保护, 2014, 47(9): 67-69.
- [9] 房本岭, 杜翠薇, 丁德, 等. 典型接地材料在陕北黄土高原土壤模拟液中的短期腐蚀行为[J]. 材料保护. 2018, 51(4): 43-46.
- [10] 蔡焕青, 邵瑰玮, 胡霁, 等. 3种新型接地网用合金钢的耐酸性土壤腐蚀性能[J]. 材料保护. 2015, 48(9): 22-24.
- [11] 郑敏聪, 李建华, 聂新辉, 等. 镀锌钢接地材料在酸性土壤中的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(1): 27-32.
- [12] 陈散兴. 接地网材料在我国典型土壤环境下的腐蚀研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2016.
- [13] 王铁铮, 刘晓琳, 关潇卓, 等. 氯离子对吉林地区镀锌钢和不锈钢土壤腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺. 2025, 4: 1-9.
- [14] 赵德云. X射线荧光光谱法测定新疆盐渍化土壤中高含量氯[J]. 农业与技术. 2021, 41(17): 41-43.
- [15] 张洪萍, 杨晓华. 新疆北部地区盐渍土的腐蚀机理及防治措施[J]. 西部探矿工程, 2010, 22(11): 9-12.
- [16] 李伟光, 肖盼, 刘溢, 等. Q235钢在某地区土壤环境中的长期腐蚀行为[J]. 表面技术, 2024, 53(18): 67-77.
- [17] 陈敏娟, 陈浩, 陆松. 锌及锌合金镀层盐雾试验腐蚀形态研究[J]. 环境技术. 2020, 38(3): 56-60.