

# 土壤异质性对模拟直流场环境下 X70 钢的腐蚀行为影响

田倩倩<sup>1</sup>, 王志高<sup>1</sup>, 丁德<sup>2</sup>, 兰新生<sup>1</sup>, 吴健<sup>2</sup>, 耿植<sup>1</sup>, 白晓春<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**通过模拟直接地极不平衡电场,研究了 X70 钢在四川宜宾 ±800 kV 复龙特高压直流换流站接地极附近土壤中的腐蚀行为。结果表明,土壤性质对埋地金属的腐蚀性影响较大。其中,土壤 pH 值对 X70 钢在直流接地极附近土壤中的腐蚀速率有显著影响,腐蚀速率与土壤酸碱性的关系为酸性 > 中性 > 碱性;同时,土壤总含盐量越大,金属腐蚀速率越大。该研究为评估直接地极附近埋地金属设施的腐蚀影响和新建特高压直流工程接地极的设计规划选址提供一定的依据。

**关键词:**直接地极;土壤性质;X70 钢;腐蚀特性

**中图分类号:**TM862 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0024-05

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20210106

## Influence of Soil Heterogeneity on Corrosion Behavior of X70 Steel in Simulated Direct Current Electric Field

Tian Qianqian<sup>1</sup>, Wang Zhigao<sup>1</sup>, Ding De<sup>2</sup>, Lan Xinsheng<sup>1</sup>, Wu Jian<sup>2</sup>, Geng Zhi<sup>1</sup>, Bai Xiaochun<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

**Abstract:** The corrosion behavior of X70 steel is studied through the simulation of DC electric field, which is buried around the ultra high voltage direct current (UHVDC) grounding electrode of Fulong ±800 kV converter station in Yibin of Sichuan province. The results indicates that the soil property has a significant impact on the corrosion behavior of X70 steel. The corrosion rate of X70 steel is accelerated in the acid soil, and in different soil environments, the corrosion rate of X70 steel is ranked in the order, that is, acid soil > neutral soil > alkaline soil. Besides, higher content of the salt in the soil will increase the corrosion rate of X70 steel. This study will provide important references for assessing the corrosion influence of the underground metallic facilities near UHVDC grounding electrodes, and especially be helpful for the site selection of the grounding electrode for new UHVDC transmission projects.

**Key words:** direct current grounding electrode; soil property; X70 steel; corrosion behavior

## 0 前言

随着中国经济的高速发展,电力需求迅速增长,建设以特高压电网为骨干网架的坚强智能电网正成为国家电力建设的战略目标。远距离、大容量的特高压直流输电工程日益增多。目前已有向家坝—上海、锦屏—苏南、宜宾—金华、哈密—郑州等多

条 ±800 kV 特高压直流输电工程投运,还有多条特高压直流输电工程在建<sup>[1-2]</sup>。直流输电工程在运行中,单极—大地运行和双极不平衡运行方式都会有一定的电流通过接地极流入大地,在很大范围内形成一个恒定的直流电流场。由于存在土壤电阻,这个电场会有不同程度的压降,当电场所处的土壤中埋设有连接不同等电位线的油气管道、输电线路杆塔接地体或变电站接地网等地下金属设施时,低

电位点处的金属构件将会发生电化学腐蚀<sup>[3-5]</sup>。

据报道,受三峡—上海  $\pm 500$  kV 高压直流输电工程单极运行影响,西气东输管道芙蓉至上海段阴极保护设备出现异常,管道电位正向或负向大幅偏移,正向偏移幅度最高达 830 mV(VS. CSE),负向偏移幅度最高达 1410 mV(VS. CSE)<sup>[6]</sup>。溪洛渡—从化  $\pm 500$  kV 直流输电工程在单极运行时,广东翁源接地极附近的西气东输管道受其干扰,在管道上产生较高的干扰电位,可能会导致管体腐蚀<sup>[7]</sup>。加拿大魁北克—新英格兰  $\pm 450$  kV 直流输电系统发生故障,1200 A 电流流入大地,附近管道上产生了 300~700 mV 的电位偏移<sup>[8]</sup>。

电位差是发生电化学腐蚀的必备条件,当金属结构处于稳定电场中,具有一定电位差,作为腐蚀原电池导线回路的土壤则成为腐蚀体系的主要影响因素。现有的一些研究建立了接地极在土壤中的电场分布模型,但将土壤视为均一性<sup>[9]</sup>。实际中由于地形、土壤成分、结构的复杂性,土壤性质对埋于其中的金属腐蚀作用有显著的不同,如含  $\text{Cl}^-$  时易发生局部腐蚀;有较多碳酸盐时,结构表面易形成坚硬腐蚀产物层,阻挡腐蚀进一步扩展等。由此可以看出,土壤的性质大体决定了金属在其中的腐蚀行为,但是目前对于直流接地极存在时的有关土壤性质的腐蚀行为研究还较少。

根据对四川宜宾  $\pm 800$  kV 复龙换流站接地极附近输气管道腐蚀的调研情况发现,在距接地极相同距离的条件下,不同土壤环境下管道腐蚀穿孔的数量分布不均,这可能跟该管段所处的土壤性质有直接关系。因此,针对具体的直流接地极,研究了典型管线钢 X70 在不同土壤中的电化学腐蚀特性,对其腐蚀规律和腐蚀机理进行了分析,为评估直流接地极附近埋地金属设施的腐蚀影响和新建特高压直流工程接地极的设计规划选址提供一定的依据。

## 1 实验方法

### 1.1 实验材料

电极材料选用 X70 高强管线钢,其化学成分见

表 1 X70 管线钢化学成分

元素名称	Fe	C	Si	Mn	P	S	其他元素(Nb,V,Ti,Mo)
质量分数/%	$\geq 98$	$\leq 0.05$	$\leq 0.30$	1.0~1.6	$\leq 0.01$	$\leq 0.01$	余量

表 1。

### 1.2 土壤理化性质分析

#### 1.2.1 土壤样品采集

土壤样品采集于四川宜宾  $\pm 800$  kV 复龙换流站接地极附近,该接地极水平敷设,采用同心双圆环的方式,外环和内环半径分别为 315 m 和 240 m,截面为  $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ ,内环埋设深度 3.5 m,外环埋设深度 4.0 m,均采用焦炭填充。土壤样品分别取自距复龙接地极等距离(距接地极极心约 800 m)的不同位置。其中,S1 号土样取自水田,S2 号土样取自泥滩,S3 号土样取自道路旁,S4 号土样取自水渠边,S5 号土样取自村舍。各取样点与接地极的相对位置见示意图 1。取样深度均为距地表深度 80 cm。采集的土壤样品进行自然风干,风干后的土壤样品密封备用。

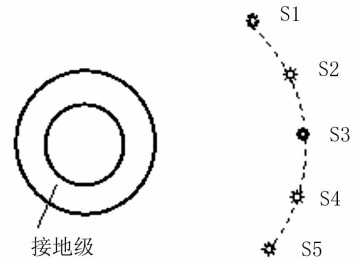


图 1 土样取样点

#### 1.2.2 土壤 pH 值测试

称取通过 20 筛孔(1 mm)的风干土样 20 g,放在 50 mL 高型烧杯中。加入 20 mL 去离子水,在磁力搅拌器上搅动 1 min,使土壤充分散开。放置 30 min 使其平衡,此时应避免空气中有氨或挥发性酸。将 pH 电极插到下部悬液中,并轻轻摇动,随后将甘汞电极插入上部清液中进行 pH 测定,数分钟内即可测得稳定读数。

#### 1.2.3 土壤离子成分测试

土壤中各离子成分测试时取水土比为 1:1 的土壤抽滤液各 100 mL,阴、阳离子分别采用 ICS-2100 型离子色谱仪 Ion Chromatography (Thermo Fisher Scientific Inc.) 和 iCAP 7000 等离子发射光谱仪 ICP-OES (Thermo Fisher Scientific Inc.) 进行成分及其含量的测试。

### 1.3 电化学测试

电化学实验采用 CS350 型电化学工作站 Electrochemical Workstation (Wuhan Corrtest Instruments Corp., Ltd.) 进行三电极体系测量。在三电极体系两端设置一个 5 mV 的电势差,正负极间隔 500 mm,用以模拟直接地板的腐蚀电场。工作电极为 10 mm × 10 mm 的 X70 高强度管线钢,辅助电极为铂电极,参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。极化曲线 zifu 扫描速率为 1 mV/s,扫描范围设置为相对于自腐蚀电位 ± 300 mV(相对开路电位)。电化学阻抗谱测量频率范围为 0.05 Hz ~ 100 kHz。所有实验均在土壤:水 = 1:1 的混合液中进行。

## 2 实验结果

### 2.1 土壤理化性质

表 2 所示为本次实验所用土壤的理化性质分析结果。从表 2 中可以看出,5 种土壤样品的理化性质有明显的差异。S5 号土壤为偏酸性土壤,S1 号和

S4 号土壤为中性土壤,S2 号和 S3 号土壤为偏碱性土壤。对于中性土壤,总含盐量及  $\text{Cl}^-$  含量由大到小依次为  $\text{S1} > \text{S4}$ 。对于碱性土壤,总含盐量及  $\text{Cl}^-$  含量由大到小依次为  $\text{S2} > \text{S3}$ 。

### 2.2 极化曲线

图 2 为 X70 钢在不同土壤中的极化曲线。X70 钢在不同土壤中的极化曲线形状大体相似,在自腐蚀电位以下处于活化状态,且活化区域较宽。当电位高于自腐蚀电位时,随着阳极极化电位升高,阳极电流密度加快,阳极溶解反应发生,随后增速降低,开始发生钝化反应,X70 钢表面的阳极溶解反应受到阻碍,腐蚀速率降低。采用塔菲尔曲线对极化曲线进行拟合,相应的拟合结果见表 3。

从表 3 中可以看出,土壤 pH 值对 X70 钢的腐蚀速率影响显著。偏酸性土壤中 X70 钢的腐蚀速率最快,中性土壤中 X70 钢的腐蚀速率相对于偏碱性土壤中 X70 钢的腐蚀速率快。由表 3 中的极化电流密度和腐蚀速率可见,土壤的腐蚀性由大到小依次为  $\text{S5} > \text{S1} > \text{S4} > \text{S2} > \text{S3}$ 。X70 钢在土壤的水

表 2 不同土壤样品理化性质

检测项目	S1	S2	S3	S4	S5
pH	7.07	8.00	7.61	7.04	6.31
$\text{Al}^{3+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	6.30	569.00	—	2.50	—
$\text{Cu}^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	6.90	—	—	1.70	—
$\text{Fe}^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	622.30	89.50	117.00	325.60	352.60
$\text{Ca}^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	11.39	41.01	26.20	9.59	3.98
$\text{Mg}^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.81	6.83	4.37	2.36	1.08
$\text{K}^+ /(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.45	0.38	0.15	0.16	0.12
$\text{Na}^+ /(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	3.41	1.47	0.89	0.45	0.10
$\text{Cl}^- /(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	9.85	4.09	3.02	2.37	2.12
$\text{SO}_4^{2-} /(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	12.00	76.86	71.06	22.35	2.28
总含盐量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	674.41	789.14	222.69	367.08	362.28

注:“—”代表未检出。

表 3 X70 钢在不同土壤中的极化曲线拟合参数

土壤编号	$E_0/\text{V}$	$i_{\text{corr}}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\beta_a/\text{V}^{-1}$	$\beta_c/\text{V}^{-1}$	$\beta_a/\beta_c$	速率/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$
S1	-0.780	$5.197 \times 10^{-6}$	8.484	4.636	1.83	0.239
S2	-0.778	$2.553 \times 10^{-6}$	12.575	4.401	2.86	0.117
S3	-0.826	$2.061 \times 10^{-6}$	10.261	6.523	1.57	0.095
S4	-0.775	$4.287 \times 10^{-6}$	9.786	3.856	2.58	0.197
S5	-0.782	$7.221 \times 10^{-6}$	7.149	4.598	1.55	0.331

注: $E_0$ 为自腐蚀电位; $i_{\text{corr}}$ 为自腐蚀电流密度; $\beta_a$ 为阳极斜率; $\beta_c$ 为阴极斜率。

溶液中的腐蚀过程,包括铁的阳极溶解和溶解氧的阴极还原这组共轭反应。由阳极塔菲尔斜率/阴极塔菲尔斜率之比  $\beta_a/\beta_c$  可以看出,X70 钢在几种土壤中的腐蚀过程都表现出较为强烈的阳极控制为主的混合控制的腐蚀体系。

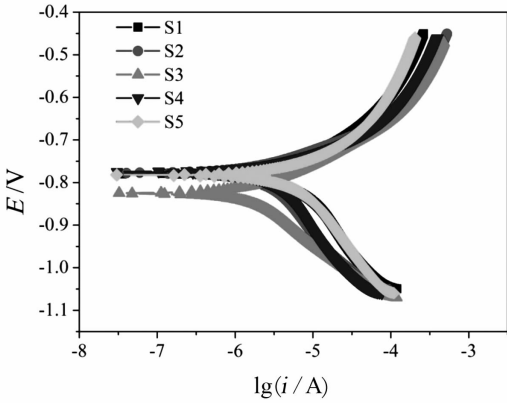


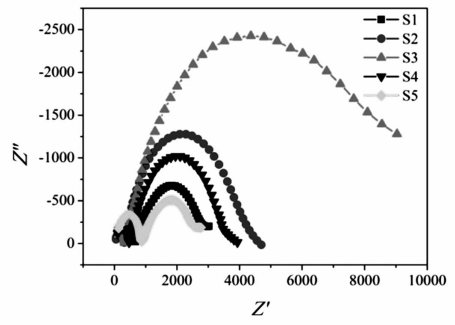
图 2 X70 钢在不同土壤样品中的极化曲线图谱

### 2.3 交流阻抗

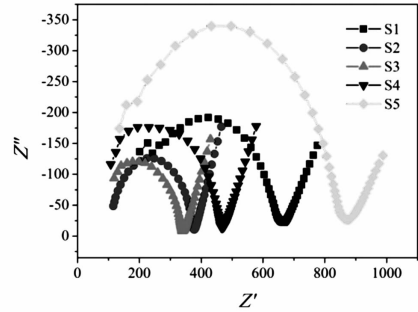
对 X70 钢在不同土壤样品中的交流阻抗谱进行了研究,图 3 的 X70 钢阻抗图谱表现为具有 2 个时间常数的双容抗弧,即高频部分的容抗弧 ( $R_1$ ) 和低频部分的感抗弧 ( $R_t$ ),其腐蚀受电荷传递过程控制。其中高频的容抗弧反映的是溶液穿透表面层和腐蚀产物在基体表面形成双电层的容抗和阻抗,低频的容抗弧反映的是表面层和腐蚀产物膜对基体的保护作用,其等效电路图如图 4 所示。其中, $R_0$  为土壤水溶液电阻; $R_1$  为电极表面腐蚀产物与吸附的土粒的结合层的电阻; $R_t$  为电荷转移电阻; $C_t$  为结合层电容; $C_p$  为双电层电容。

从图 3(a)中可以看出,S5、S1、S4、S2 及 S3 土壤中的 X70 钢结构的高频部分的容抗弧 ( $R_1$ ) 逐渐减小。从图 3(b)中可以看出,低频部分的感抗弧 ( $R_t$ ) 逐渐增大。根据 Corrttest 软件模拟的不同土壤交流阻抗拟合参数如表 4 所示。对于  $R_1$  而言,在偏酸性土壤中,高湿度条件下,钢表面的腐蚀产物结合层不稳定,不能对电极反应形成阻碍, $H^+$  离子的还原反应易于进行,故 S5 号土壤的  $R_1$  最小,故而其腐蚀速率最大。而对于偏碱性的 S3 号土壤来说,随着腐蚀反应的进行,钢表面的腐蚀产物结合层越来越致密,且土壤中较低的离子浓度,严重阻碍氧的传输过程,造成  $R_1$  最大,相应的其腐蚀速率最小。

可见,利用  $R_1$  的倒数可以作为钢/土壤体系腐蚀性评价的指标。其结果与极化曲线拟合结果相



(a) X70 钢在不同土壤中的阻抗图谱



(b) X70 钢高频部分的容抗弧

图 3 X70 钢在不同土壤中的 Nyquist 图

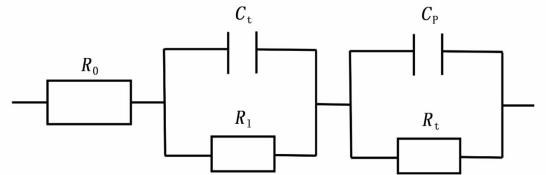


图 4 X70 钢在不同土壤中的阻抗测试等效电路一致。即偏酸性的 S5 号土壤,在高含水量条件下, $H^+$  离子的还原反应易于进行,腐蚀性最强。而偏碱性的 S3 号土壤表面的液膜及较低的离子浓度,严重阻碍氧的传输过程,腐蚀性最低。

### 2.4 分析与讨论

由上述结果分析可见,在接地极不平衡电流场环境中,土壤性质对埋地金属的腐蚀影响较大,特别是土壤中 pH 值的改变对土壤中 X70 钢的腐蚀速率影响显著。这是因为在酸性土壤中,以析氢腐蚀为主,而在中性及偏碱性体系中,以吸氧腐蚀为主。析氢腐蚀速率较吸氧腐蚀速率大,因此在酸性土壤中 X70 钢的腐蚀速率较高<sup>[10]</sup>。此外,在土壤的饱和溶液中,酸性土壤中的  $H^+$  离子的还原反应易于进行,故酸性土壤中的腐蚀速率最快。而在中性土壤和偏碱性土壤中,钢结构表面的水膜以及腐蚀产物层阻碍了氧的传输过程,因此腐蚀速率较低。

土壤含盐量增加了土壤的电导率,减少了电阻极化,增加了腐蚀速率。对于中性土壤,S1 号土壤

表 4 X70 钢在不同土壤中的交流阻抗拟合参数

土壤编号	$R_0$	$R_1$	$C_1$	$C_p$	$R_t$
S1	201.00	443.00	0.000 241 45	0.642 03	2 392.00
S2	48.63	265.50	0.000 148 40	0.758 53	3 994.00
S3	81.68	255.60	0.000 202 92	0.708 58	8 711.00
S4	72.76	391.20	0.000 159 51	0.725 90	3 225.00
S5	110.90	736.60	0.000 285 96	0.601 93	1 957.00

的腐蚀速率大于 S4 号土壤,这可能是因为 S1 号土壤中可溶性盐离子的浓度为 674.41 mg/L,比 S4 号土壤中的 367.08 mg/L 高约一倍,土壤电导率较高,易于氧的传输过程的进行。所以 S1 号土壤的腐蚀速率较快。同样道理,偏碱性土壤,S2 号土壤的总含盐量以及  $\text{Cl}^-$  含量大于 S3 号土壤,故 S2 号土壤的腐蚀速率较高。

土壤中的  $\text{Cl}^-$  等侵蚀性离子团的存在,不仅能够增强土壤电导率,而且能够破坏 X70 钢表面的钝化膜,使得 X70 钢表面所产生的腐蚀产物层失去了保护性,使试样腐蚀的阳极化过程加快,并透过基体表面腐蚀层和基体生成可溶性产物,促进试样腐蚀。<sup>[11]</sup>

### 3 结 语

1) 在直流接地极不平衡电流场中,土壤性质对埋地金属的腐蚀性影响较大,金属在与接地极等距离的不同位置处的土壤中腐蚀特性差别较大。

2) 土壤 pH 值的改变对土壤中 X70 钢的腐蚀速率影响显著。腐蚀速率与 pH 值的关系为酸性 > 中性 > 碱性。因为在酸性土壤中,以析氢腐蚀为主;而在中性及偏碱性体系中,以吸氧腐蚀为主。析氢腐蚀速率较吸氧腐蚀速率大,因此在酸性土壤中 X70 钢的腐蚀速率较高。

3) 土壤总含盐量越大,其土壤的导电性则越大,从而为 X70 钢的腐蚀提供了良好的离子通道,促使金属腐蚀速率相应增大。

4) 随土壤侵蚀性阴离子  $\text{Cl}^-$  含量增大,使得 X70 钢表面所产生的腐蚀产物层失去了保护性,因此腐蚀速率增大。

#### 参考文献

[1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出

版社, 2013.

- [2] 刘振亚. 全球能源互联网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] 魏德军. 直流接地极对地下金属设施的电腐蚀影响 [J]. 电网技术, 2008, 32(2): 75-77.
- [4] 迟兴和, 张玉军. 直流接地极与大地中金属管道的防护距离 [J]. 电网技术, 2008, 32(2): 71-74.
- [5] 胡毅. 直流接地极电流对输电线路接地构件的腐蚀影响研究 [J]. 中国电力, 2000, 33(1): 58-61.
- [6] 程明, 张平. 鱼龙岭接地极入地电流对西气东输二线埋地钢质管道的影响分析 [J]. 天然气与石油, 2010, 28(5): 22-26.
- [7] 孟晓波, 廖永力, 李锐海, 等. 金属管道受人地电流影响的抑制措施研究 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 62-67.
- [8] Peter Nicholson. High Voltage Direct Current Interference with Underground/Underwater Pipelines [C]. NACE International Corrosion 2010 Conference and Expo, 2010: 10102.
- [9] 朱轲, 吴驰, 扬威. 直流接地极对附近输电线路杆塔的腐蚀影响及防护措施的研究 [J]. 高压电器, 2011, 47(10): 41-47.
- [10] 曹英, 刘磊, 曹默, 等. 接地网材料在四种典型土壤中的电化学腐蚀研究 [J]. 东北电力大学学报, 2014, 34(1): 35-38.
- [11] 闫爱军, 刘瑞, 宋卫荣, 等. 土壤环境因素对碳钢接地材料腐蚀性影响 [J]. 腐蚀和防护, 2012, 33(S2): 159-165.

#### 作者简介:

田倩倩(1989), 女, 工程师, 硕士研究生, 从事电力用油试验与研究、金属腐蚀与防护工作。

(收稿日期: 2020-10-22)