

# 酸性土壤中接地网牺牲阳极阴极保护法研究

杜鹏<sup>1</sup>, 刘欣<sup>2</sup>, 郜友彬<sup>3</sup>, 李多生<sup>3</sup>, 裴锋<sup>2</sup>, 刘光明<sup>3</sup>, 田旭<sup>2</sup>, 蒋磊<sup>3</sup>

(1. 国网江西省电力公司赣州供电分公司, 江西 赣州 341200;

2. 国网江西省电力科学研究院, 南昌 330096;

3. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063)

**摘要:** 目的 提高牺牲阳极的阴极保护法在酸性土壤中对接地网的防腐能力, 分析牺牲阳极阴极保护法在酸性土壤中应用的技术要点, 总结保护效果优化措施。方法 设计牺牲阳极模拟系统, 模拟地网面积为 3.52 m<sup>2</sup>, 保护电流设计为 35.2 mA, 对 Q235 碳钢和镀锌钢两种常用接地材料的接地电阻、保护电位及保护电流进行研究。结果 该方法对镀锌钢保护较好, 保护电位均低于 -0.95 V; 对 Q235 碳钢保护较差, 保护电位部分高于 -750 mV, 且波动较大, 最大波幅可达 201 mV。系统运行中, 计算得出保护电流在降雨量较大时最高可达 30.75 mA, 降雨量较小时最低为 11.89 mA, 均低于设计值。结论 由于阳极处砂石较多、土壤电阻率高, 阳极不能完全释放电流。其次, 土壤保水性差, 电阻率波动大, 系统运行不稳定也抑制了保护效果。酸性土壤盐基性离子大量淋失, 土壤电阻率普遍较高, 且受降雨扰动较大, 牺牲阳极工作效率较低且稳定性差。需采用适当提高保护电流、降低阳极区土壤电阻率、优化阳极设计工艺参数等措施以达到良好的保护效果。

**关键词:** 酸性土壤; 牺牲阳极; 阴极保护; 接地电阻; 保护电位; 保护电流

中图分类号: TG174.41 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2015)10-0111-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.10.019

## Galvanic Anode Cathodic Protection of Grounding Grid in Acidic Soils

DU Peng<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>2</sup>, GAO You-bin<sup>3</sup>, LI Duo-sheng<sup>3</sup>,

PEI Feng<sup>2</sup>, LIU Guang-ming<sup>3</sup>, TIAN Xu<sup>2</sup>, JIANG Lei<sup>3</sup>

(1. Jiangxi Ganzhou Power Supply Company, Ganzhou 341200, China;

2. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

3. Material Science and Engineering School, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To improve the corrosion resistance of galvanic anode cathodic protection for grounding grid in acidic soil, analyze key technologies of the application of galvanic anode cathodic protection method in acid soil and summarize measures for improving the protection effect. **Methods** The designed simulated expendable anode system was applied to widely investigate grounding resistance, protection potential and protection current of Q235 steel and galvanized steel with 3.52 m<sup>2</sup> grounding grid and

收稿日期: 2015-05-25; 修订日期: 2015-07-19

Received: 2015-05-25; Revised: 2015-07-19

作者简介: 杜鹏(1983—), 男, 江西人, 高级工程师, 主要研究方向为电气工程。

**Biography:** DU Peng(1983—), Male, from Jiangxi, Senior engineer, Research focus: electrical engineering.

通讯作者: 裴锋(1978—), 男, 江西人, 高级工程师, 主要研究方向为应用化学。

**Corresponding author:** PEI Feng(1978—), Male, from Jiangxi, Senior engineer, Research focus: applied chemistry.

35.2 mA protection current. **Results** Galvanized steel was well protected and the protective potential was lower than  $-0.95$  V. But the protection of Q235 steel was less effective, and the protective potential exceeded  $-750$  mV with fluctuation of 210 mV sometimes. During the operation, the protective current could reach 30.75 mA when the precipitation was high, and was reduced to 11.89 mA when the precipitation was low, both of which were lower than the design values. **Conclusion** This was mainly due to high soil resistivity in the anode environment, more gravel resulted in less anode current. Second, poor soil water retention, resistance fluctuations, and unstable systems also decreased the protective effect. The salinity of acidic soil was greatly lost. The soil resistivity was high and disturbed by rainfall, so the work efficiency and stability were limited. Protection current was improved by measures such as reasonable increase of protection current, reduction of soil resistivity in the anode environment, and optimization of anode design process parameters.

**KEY WORDS:** acidic soil; sacrificial anode; cathodic protection; ground resistance; protective potential; protective current

江西土壤以酸性红壤为主,土壤中盐基性离子淋失严重,电阻率普遍较高,且受季节和气候的影响较大<sup>[1-2]</sup>。研究发现接地网在本地区土壤中腐蚀严重,如江西赣州2003年投运的红金变电站、2001年投运的寻乌变电站的接地网都已严重腐蚀,接地电阻过大,严重影响了变电站的正常运行。

目前最常用的接地网防腐措施采用更耐蚀的铜材料和碳钢表面镀锌。但铜材成本较高,且在酸性土壤中会腐蚀产生有害物质;镀锌钢在酸性土壤中腐蚀较快,锌层腐蚀速率会随着土壤pH值的减小而增大<sup>[3]</sup>。通过向接地网施加一个阴极保护电流,使地网阴极极化,从而得到保护<sup>[4]</sup>。其中牺牲阳极法是通过腐蚀电位更低的金属向地网提供保护电流,其无需外部电源、系统设计简单、无需维护、安装简便<sup>[5]</sup>。彭泽焯等<sup>[6]</sup>研究了海水中的牺牲阳极保护法,发现温度越高,保护效果越差。林永华等<sup>[7]</sup>研究发现,在黑粘土壤中缓蚀剂和牺牲阳极法联合对碳钢接地材料保护效果最佳。方志刚等<sup>[8]</sup>研究发现干湿交替的海洋环境下,Al-Zn-In-Mg-Ga-Mn阳极是较为理想的阳极材料。乔进朝等<sup>[9]</sup>在偏碱性含盐沙质土中进行牺牲阳极试验,研究发现镁合金阳极较锌合金阳极保护效果更好,且保护效果和土壤湿度、透气性及氧化还原电位等因素有关。Boguslaw Pierozynski等<sup>[10]</sup>研究发现,阴极保护过程中镀镍碳纤维有助于降低阳极土壤电阻率和系统的稳定。目前,牺牲阳极保护法在南方酸性土壤环境的接地网中的应用不多,具体的施工工艺以及防腐效果还需要探索研究。

本文在江西地区挑选典型的酸性土壤环境,进行牺牲阳极的阴极保护模拟试验,详细分析牺牲阳极系统的设计和安装过程,研究牺牲阳极法对Q235钢和镀锌钢材料的保护效果及影响因素,总结提高牺牲阳极系统工作效率的有益措施,为酸性土壤环境中接地网的牺牲阳极阴极保护法的应用提供借鉴。

## 1 试验

在南昌选择一个试验场地,在试验前测得土壤pH值为5.5,土壤电阻率为 $120 \Omega \cdot \text{m}$ ,为典型的酸性土壤环境。接地网材料选用碳钢和镀锌钢,两种材料规格为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。本模拟接地网为网格正方形,总边长为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ,网格为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。地网埋深为 $0.6 \text{ m}$ ,节点处采用电焊连接。经计算,地网表面积为 $3.52 \text{ m}^2$ 。

### 1.1 牺牲阳极系统的设计

#### 1.1.1 确定保护电流

根据DL/T 5394—2007中相关要求,土壤电阻率越高,则选用保护电流就越小,当电阻率高于 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 时,保护电流密度宜取 $10 \text{ mA}/\text{m}^2$ ,本设计中总的保护电流为 $35.2 \text{ mA}$ 。

#### 1.1.2 牺牲阳极的选择原则

当土壤电阻率在 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 以下时,采用锌合金牺牲阳极;当土壤电阻率在 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 以上时,采用镁合金牺牲阳极。由于本地区土壤电阻率较高,选用棒状标准型镁合金作为牺牲阳极,其成分以及相应填料符合GB/T 21448—2008中相关规定,单支阳极重 $11 \text{ kg}$ 。

#### 1.1.3 单支牺牲阳极发生电流

根据DL/T 5394—2007,单支阳极接地电阻 $R$ 的计算见式(1):

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln \frac{2L}{D} \left( 1 + \frac{\frac{L_1}{4L}}{\ln^2 \frac{L_1}{D_1}} + \frac{\rho_1}{\rho} \ln \frac{D_1}{D} \right) \right] \quad (1)$$

式中: $L$ 为阳极长度, $L=0.7 \text{ m}$ ;  $L_1$ 为填料包长度, $L_1=0.95 \text{ m}$ ;  $D$ 为阳极当量直径, $D=0.118 \text{ m}$ ;  $D_1$ 为填料包直径, $D_1=0.218 \text{ m}$ ;  $\rho$ 为土壤电阻率, $\rho=120$

$\Omega \cdot m$ ;  $\rho_1$  为填充料电阻率,  $\rho_1 = 1.0 \Omega \cdot m$ ;  $l$  为从地面至阳极中心的埋深,  $l = 0.6 m$ 。经计算得  $R = 55.44 \Omega$ 。

取牺牲阳极的利用率为 0.7, 则每只阳极的平均发生电流  $I_m$  的计算见式(2):

$$I_m = 0.7 \frac{\Delta E}{R} \quad (2)$$

式中:  $\Delta E$  为阳极驱动电位, 镁合金阳极取  $-0.65 V$ 。经计算得  $I_m = 8.20 mA$ 。

### 1.1.4 确定牺牲阳极数量

根据上述结果, 可以计算得到保护本模拟地网所需阳极的最少数量  $N$ , 其计算见式(3):

$$N = \frac{I}{I_m} \quad (3)$$

经过计算, 至少需要 5 套阳极, 因此本试验初步选用 5 套牺牲阳极。

### 1.1.5 牺牲阳极系统设计图

本系统中, 在地网上设 4 处阴极测试点, 测试位置如图 1 所示。其中 1 号测试点设在镀锌钢处, 其余设在碳钢处。这 4 个测试点附近各埋设一个饱和硫酸铜参比电极, 测量地网不同位置处的保护电位。在距离地网 8 m 处埋设镁合金阳极, 牺牲阳极间间距 1.2 m, 阳极埋深 0.7 m, 并通过铜电缆在 3 号测试点附近与地网连接。在阳极处设 5 号测试点, 以便于阳极极化电位以及保护电流的测量。本系统于 2014 年 8 月 10 日开始运行。

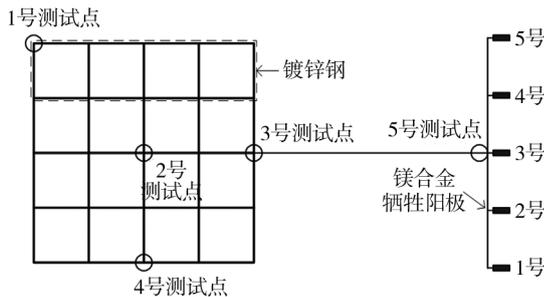


图 1 牺牲阳极保护接地网示意图

Fig. 1 The diagram of grounding grid protected by galvanic anode

## 1.2 测试方法

### 1.2.1 接地电阻的测试

采用直线法测量接地电阻。根据 DL/T 475—2006 中相关规定, 电流极和测试接地装置边缘的距离  $d_{CC}$  应为被测试接地装置最大对角线长度  $D$  的 4 ~ 5 倍, 电压极距接地装置  $d_{PC}$  通常为  $(0.5 \sim 0.6) d_{CC}$ 。结合本模拟地网的具体情况, 本试验中  $d_{CC} = 26 m$ ,

$d_{PC} = 15 m$ 。

### 1.2.2 保护电位的测试

保护电位采用近参比法测量, 每个测试点附近埋设饱和  $Cu/CuSO_4$  参比电极, 用万用表定期测量测试点地网相对于参比电极的保护电位。根据 GB/T 21448—2008 和 SY/T 0036—2000 对保护电位的相关要求, 对于土壤电阻率在  $100 \sim 1000 \Omega \cdot m$  的环境中, 阴极保护电位宜低于  $-0.75 V$ , 或自然电位负向极化  $100 mV$ 。

### 1.2.3 保护电流的计算与测试

结合 GB/T 21448—2008, 保护电流  $I_g$  的计算见公式(4):

$$I_g = \frac{e_c - e_a}{R_g + R_c} = \frac{\Delta E}{R} \quad (4)$$

式中:  $e_c$  为阴极极化电位,  $V$ ;  $e_a$  为阳极极化电位,  $V$ ;  $\Delta E$  为牺牲阳极有效电位差,  $V$ ;  $R_g$  为牺牲阳极接地电阻;  $R_c$  为地网接地电阻;  $R$  为回路总电阻。

保护电流采用直测法测量。根据 GB/T 21246—2007, 断开阳极与地网, 用万用表直接测量保护电流。

## 2 结果与讨论

### 2.1 接地电阻的分析

接地电阻主要由接地体电阻、接地体与土壤接触电阻和土壤的散流电阻等部分组成, 主要受土壤的散流电阻影响<sup>[11]</sup>。接地电阻的大小和变化有助于阳极系统周围土壤环境及阳极工作效率的分析。本实验从系统运行即开始定期测量接地网和阳极接地电阻, 结果如图 2 和图 3 所示(接地电阻测试值误差在  $\pm 3 \Omega$  以内)。

从图 2 中可以看出, 地网接地电阻初测值异常偏

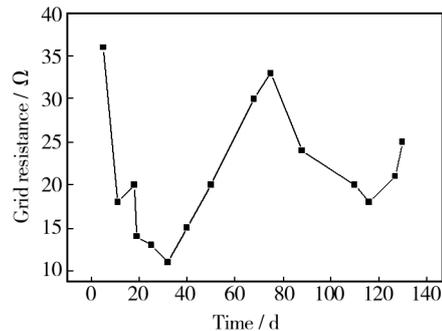


图 2 阴极保护系统地网接地电阻与时间的关系

Fig. 2 Relationship between grid resistance and time in cathodic protection system

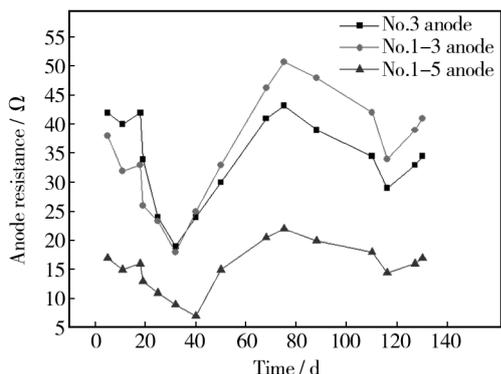


图3 阴极保护系统阳极接地电阻与时间的关系

Fig. 3 Relationship between anode resistance and time in cathodic protection system

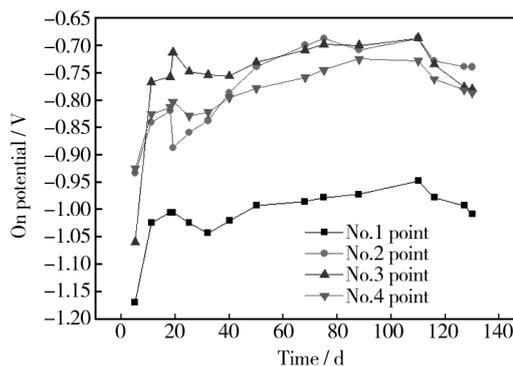


图4 地网保护电位与时间的关系

Fig. 4 Relationship between protective potential of grid and time

大,这主要因为地网埋设初期与土壤接触不紧密,接触电阻很大,随后急剧降低。在前 50 d(即 8 月份和 9 月份)地网接地电阻值较低,均不超过 20 Ω;在随后的 30 d(即 10 月份)则开始迅速升高,最高达 33 Ω;继续 30 d 后(即 11 月份)又开始降低;最后的 30 d(即 12 月份)又有上升趋势,波动很大。图 3 中,阳极接地电阻值整体变化趋势与地网接地电阻一致。研究发现,2014 年 8 月—12 月的降雨量依次为 124.6, 70.4, 55.7, 76.4, 44.1 mm,其变化大致与接地电阻的变化吻合。这说明本地区土壤吸水保水性能很差,接地电阻和土壤电阻率受水含量影响很大。这会对阳极系统的发电流量和稳定性产生较大影响。

此外,图 3 中 1—3 号牺牲阳极并联后的接地电阻异常偏高,在系统运行 40 d 后逐渐高于 3 号单个牺牲阳极。经检查 1—3 号牺牲阳极接线完好,但埋设位置局部存在大量砂石,土壤干燥,这是导致其接地电阻异常升高的主因。对于牺牲阳极阴极保护系统,阳极区土壤性质很重要,对于土壤电阻率较高的区域,阳极周围应置换成细小且吸水性好的土壤。

## 2.2 保护电位的分析

对于阴极保护系统,地网的保护电位以及保护电流常作为初始设计的重要参数,其中保护电位是系统运行中监控的重要指标。保护电位是阴极保护时使金属停止腐蚀所需的电位值,保护电位有一定的范围,如果太高则会保护不足,但若太低阴极上会产生析氢反应,氢气的产生则可能导致钢质接地材料的氢致开裂<sup>[12-13]</sup>。试验中所测的保护电位如图 4 所示(保护电位测试值误差在±0.03 V 以内)。

图 4 中,1 号测试点处为镀锌钢,在阴极保护前

腐蚀电位为-0.784 V,由于与碳钢接地网相连后的阳极极化作用,其高于镀锌钢自身在本区域土壤中的自腐蚀电位-0.904 V。在系统运行后半年内,其保护电位均低于-0.95 V,牺牲阳极法和镀锌法联合具有良好的保护效果。从本质上讲,镀锌钢的保护原理和牺牲阳极阴极保护类似,其表面的镀锌层作为牺牲阳极,碳钢为阴极,锌层腐蚀失去电子使碳钢极化从而得到保护<sup>[14]</sup>。镀锌层均匀覆盖在碳钢表面,可充分保护碳钢,且不受土壤电阻率的影响。但是镀锌钢在腐蚀性较强的土壤环境中表面锌层往往腐蚀速率很快<sup>[15]</sup>。而本试验中牺牲阳极系统可向镀锌钢提供阴极电流使之极化,可延长镀锌层的寿命,也极大地提高了地网的保护程度。

第 2,3,4 号测试点处为 Q235 碳钢接地网,进行阴极保护前,各点腐蚀电位分别为-0.693, -0.709, -0.689 V,由于镀锌钢对其阴极极化作用,电位略低于碳钢自身在本区域土壤中的自腐蚀电位-0.681 V。在牺牲阳极系统运行 20 d 后,模拟地网表面状态相对稳定,在牺牲阳极和镀锌钢的双重作用下碳钢保护电位有了一定程度的降低,最低可达-0.887 V,极化程度达到 206 mV。但由于节气的影响,部分时段保护电位略高于-750 mV,极化程度小于 69 mV,碳钢接地网保护程度不足。此外,地网保护电位值随时间波动较大,2 号测试点最大值与最小值相差 201 mV,3 号测试点相差 105 mV,4 号测试点相差 104 mV,1 号镀锌钢处也波动 96 mV,说明系统存在运行不稳定的现象。结合接地电阻测试情况可以发现,这些一方面是由于牺牲阳极处局部多砂石,阳极没有完全工作,电流量偏小;另一方面,土壤电阻率较高,波动很大,而牺牲阳极输出电流不可调控,无法适应变化,也使系统稳定性偏差。因此对于土壤电阻率较高的地区,

牺牲阳极安装处应适当降低电阻,如采取置换电阻率较小的土壤、添加降阻剂等措施。

### 2.3 保护电流的分析

保护电流是牺牲阳极阴极保护系统设计过程中需考虑的一个重要参数,在系统运行监测阶段也可作为一个参数。它的大小与金属种类、表面状态(有无覆盖层及类型、覆盖层质量等)和土壤环境(如水含量、pH值、氧含量、通气程度、温度等)等因素有关<sup>[16]</sup>。在接地材料确定,表面状态变化不大的情况下,其大小变化也反映了土壤环境的变化,特别与土壤的水含量密切相关。

为不破坏阳极系统的工作状态和接地网表面结构,根据试验过程中实际测得的极化电位和接地电阻

值,通过式(4)计算保护电流的大小,结果见表1。

从表1中可以看出,系统实际运行过程中输出电流低于设计值35.2 mA,验证了阳极区高的土壤电阻率对保护电流的抑制作用。保护电流变化趋势与接地电阻相反,8月份和9月份输出电流较大,最高可达30.75 mA;10月份迅速降低,并达到最低点11.89 mA;11月份开始缓慢升高,受土壤含水量影响较大,这也是保护电位波动较大原因。其次,地网面积较小,接地电阻较大,也抑制了阳极的发生电流量。此外,由于牺牲阳极距离较近,亦会产生一定的屏蔽效应。

为验证保护电流计算公式的适用性和准确性,在牺牲阳极系统运行一段时间后,断开阳极与地网,采用直测法测量保护电流。其测试结果见表2。

表1 保护电流计算结果

Tab.1 Calculation result of protective current

测试日期	天气	阴极极化电位 (3号测点)/V	阳极极化电位 (5号测点)/V	地网接地电阻 (5号测点)/Ω	阳极接地电阻 (5号测点)/Ω	保护电流 计算值/mA
2014-08-21	晴	-0.766	-1.261	18.0	15.0	15.00
2014-08-29	暴雨	-0.712	-1.269	14.0	13.0	20.63
2014-09-11	晴	-0.753	-1.368	11.0	9.0	30.75
2014-09-29	阴	-0.730	-1.380	20.0	15.0	18.57
2014-10-17	晴	-0.708	-1.365	30.0	20.5	13.01
2014-10-24	晴	-0.697	-1.351	33.0	22.0	11.89
2014-11-06	阴	-0.699	-1.299	24.0	20.0	13.64
2014-11-28	雨	-0.686	-1.281	20.0	18.0	15.66

表2 保护电流测试与计算结果

Tab.2 Test and calculation results of protective current

测试日期	天气	阴极极化电位 (3号测点)/V	阳极极化电位 (5号测点)/V	地网接地电阻 (5号测点)/Ω	阳极接地电阻 (5号测点)/Ω	保护电流测量值 (5号测点)/mA	保护电流 计算值/mA
2014-12-04	雨	-0.734	-1.303	18.0	14.5	22.50	17.50
2014-12-15	阴	-0.775	-1.310	21.0	16.0	18.35	14.46
2014-12-18	晴	-0.779	-1.321	25.0	17.0	17.80	12.90
2015-01-06	晴	-0.791	-1.331	26.0	19.0	16.20	12.00

从表2中可以看出,计算值与测量值差距不大,略偏低,且变化趋势相同。这表明实验采用式(4)研究牺牲阳极系统的保护电流比较合理,同时本阳极系统存在着保护电流不足的问题,且受降雨量影响较大。因此对一些接地电阻较高的地网,或在土壤电阻率较高波动较大的地区,进行牺牲阳极保护时,应适当提高保护电流保护密度,并结合地形合理分散阳极安装位置,能够获得较好的阴极保护效果。

### 3 结论

1) 在酸性红壤环境中牺牲阳极法对镀锌钢具有较好的防护效果,腐蚀电位由-0.784 V极化至-0.95 V以下,极大提高了镀锌钢的寿命。对碳钢,其保护效果不稳定,电位极化值高可达206 mV,低可至69 mV,相比镀锌钢,其保护需要更多的阳极,以保证保护效果。

2) 红壤电阻率受降雨量影响波动很大,而牺牲阳极法的保护电流较难调控,很难适应土壤电阻率的剧烈变化,这对保护的效果会产生较大的影响。在系统设计阶段需综合考虑全年土壤电阻率的变化,适当提高保护电流密度,强化保护效果。

3) 埋设牺牲阳极时,应充分考虑阳极周围的土壤环境,必要时可置换电阻率较小的土壤或添加适当的降阻剂,以保证阳极能够充分工作。

4) 在牺牲阳极阴极保护过程中,根据极化电位和接地电阻的现场实测值计算出的保护电流比直测法测出的保护电流偏小,但变化趋势一致。保护电流受土壤湿度影响较大。

### 参考文献

- [1] 么惠平,闫茂成,杨旭. X80 管线钢红壤腐蚀初期电化学行为[J]. 中国腐蚀与防护学报,2014,34(5):472—476.  
YAO Hui-ping, YAN Mao-cheng, YANG Xu. Electrochemical Behavior of X80 Pipeline Steel in the Initial Stage of Corrosion in an Acidic Red Soil[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and protection,2014,34(5):472—476.
- [2] YAN M C, SUN C, XU J, et al. Role of Fe Oxides in Corrosion of Pipeline Steel in a Red Clay Soil[J]. Corrosion Science,2014(80):309—317.
- [3] 伍远辉,罗宿星,勾华. 模拟酸雨淋溶下黄壤中锌的腐蚀行为研究[J]. 表面技术,2012,41(2):12—15.  
WU Yuan-hui, LUO Su-xing, GOU Ha. Study on the Corrosion Behaviors of Zinc in Yellow Soil Leached with Simulated Acid Rain[J]. Surface Technology,2012,41(2):12—15.
- [4] 周兰,陶文亮,李龙江. 埋地钢质管道强制电流阴极联合保护研究[J]. 表面技术,2015,44(4):118—122.  
ZHOU Lan, TAO Wen-liang, LI Long-jiang. Experimental Studies on the Impressed Current Cathodic Joint Protection of Buried Metallic Pipelines[J]. Surface Technology,2015,44(4):118—122.
- [5] NAROZNY M, ZAKOWSKI K, DAROWICKI K. Method of Sacrificial Anode Transistor-driving in Cathodic Protection System[J]. Corrosion Science,2014(88):275—279.
- [6] 彭泽煊,任厚珉. 油温对海底输油管线阴极保护的影响[J]. 表面技术,2015,44(1):136—140.  
PENG Ze-xuan, REN Hou-min. Effect of Oil Temperature on the Cathodic Protection of Submarine Oil Pipeline[J]. Surface Technology,2015,44(1):136—140.
- [7] 林永华,张雪峰,韩利. 变电站接地网的防腐方法研究[J]. 中国腐蚀与防护学报,2013,33(6):501—506.  
LIN Yong-hua, ZHANG Xue-feng, HAN Li. Comparison of Corrosion Protection Measures of Grounding Grids for Electric Power Station[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2013,33(6):501—506.
- [8] 方志刚. 四种典型牺牲阳极在干湿交替环境中的性能评价[J]. 表面技术,2012,41(4):31—34.  
FANG Zhi-gang. Performance Evaluation of Four Typical Sacrificial Anodes under Wet-dry Cyclic Environment[J]. Surface Technology,2012,41(4):31—34.
- [9] 乔进朝,王进锁,张石奎. 变电站接地网牺牲阳极保护试验研究[J]. 山西电力,2009(3):21—24.  
QIAO Jin-chao, WANG Jin-suo, ZHANG Shi-kui. Testing Research on Sacrificial Anode Protection of Yuncheng Transformer Substation Grounding Network[J]. Shanxi Electric Power,2009(3):21—24.
- [10] BOGUSLAW P. Application of Nickel-coated Carbon Fibre Material in Cathodic Protection of Underground-buried Steel Structures[J]. Corrosion Science,2009(51):2605—2609.
- [11] 郝振昆. 降阻防腐技术在变电站接地网的应用分析[D]. 保定:华北电力大学,2009.  
HAO Zhen-kun. The Applied Analysis of Resistance Reduction and Corrosion Prevention Technology for Substation Grounding Grid[D]. Baoding: North China Electric Power University,2009.
- [12] 文丽娟,高志明,刘洋洋. 阴极保护电位对 Q235 钢氢脆敏感性和力学性能的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报,2013,33(4):271—276.  
WEN Li-juan, GAO Zhi-ming, LIU Yang-yang. Effects of Applied Cathodic Potential on Susceptibility to Hydrogen Embrittlement and Mechanical Properties of Q235 Steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2013,33(4):271—276.
- [13] 张涛,王长朋,刘静. X80 管线钢在酸性环境下的氢致开裂行为研究[J]. 表面技术,2014,43(6):48—52.  
ZHANG TAO, WANG Chang-peng, LIU Jing. Hydrogen Induced Cracking Behavior of X80 Pipeline Steel in Acidic Environment in China[J]. Surface Technology,2014,43(6):48—52.
- [14] 楼森,芦玉峰,周萌. Zn,Al 合金涂层在膨润土中的加速腐蚀实验研究[J]. 表面技术,2013,42(5):32—34.  
LOU Miao, LU Yu-feng, ZHOU Meng. Study on Accelerated Corrosion Experiments of Zn, Al Alloy Coatings in Bentonite[J]. Surface Technology,2013,42(5):32—34.
- [15] VICTOR P, POURIA G, AKRAM A. Effect of Deicing Salts on the Corrosion Performance of Galvanized Steel in Sulphate Contaminated Soil[J]. Construction and Building Materials,2013(40):908—918.
- [16] MUHAREMOVIC A, BEHLILOVIC N. Functional Relationship between Cathodic Protection Current/Potential and Duration of System Deployment in Desert Conditions[J]. Advances in Engineering Software,2011,42(6):359—367.