

电力系统接地用镀锌扁钢腐蚀分析与研究

王森¹, 骆鸿², 李志忠¹, 肖葵², 吉宏亮¹, 董超芳²

1. 陕西电力科学研究院国家电网公司电网接地工程技术实验室, 西安 710054
2. 北京科技大学腐蚀与防护中心, 北京 100083

摘要 针对某电力系统接地金属材料镀锌扁钢在土壤中服役 11 年后的腐蚀行为, 采用金相、扫描电镜、能谱和 X 射线衍射等技术对其进行了宏观分析、组织分析、腐蚀产物分析和断口分析。结果表明, 该镀锌扁钢接地极的腐蚀类型属全面腐蚀, 腐蚀产物主要由 FeOOH 和 Fe₃O₄ 等组成。镀锌扁钢基体中发现一些颗粒状的 Al-Si 复合型夹杂物, 这些夹杂物的存在促进了腐蚀的发生和发展, 并在局部区域为侵蚀性离子渗入基体提供了通道。研究结论表明在腐蚀环境作用下, 镀锌扁钢发生腐蚀与导电性能失效是影响接地网的散流特性和寿命的主要原因。

关键词 电力系统; 接地极; 镀锌扁钢; 土壤腐蚀

中图分类号 TG172.3

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.30.004

Corrosion Analysis on Galvanized Flat Steel Grounding Electrode of Power System

WANG Sen¹, LUO Hong², LI Zhizhong¹, XIAO Kui², JI Hongliang¹, DONG Chaofang²

1. Power Network Grounding Engineering Technology Lab of State Grid Corporation, Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China
2. Corrosion and Protection Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract The corrosion behavior of galvanized flat steel, which has been used for more than eleven years in the soil environment, is investigated by using optical microscopy, scanning electron microscopy, and X-ray diffraction techniques. It is found that the corrosion type of galvanized flat steel is mainly general corrosion after buried in soil. The corrosion products are composed of FeOOH, Fe₃O₄ and others. The EDS results show that there are some sulfur elements in the corrosion product, and the elements might be caused by the sulfate-reducing bacteria. Also there are some Al-Si composite granular inclusions existing in the substrate of galvanized steel, and the inclusions could promote the corrosion occurrence and development, therefore provide the channel for the corrosive ion to permeate into matrix in the local region. In order to extend the lifespan of grounding electrode in the soil, the galvanized steel is often considered in the design. The zinc in the soil is priority eroded to protect ordinary carbon steel's lifespan. In the absence of current role, the service lifespan of galvanized steel is indeed better. However, due to the role of the ground current, as the ground material, galvanized steel surface electrolytic zinc coating will soon come off; then the corrosion rate of grounding electrode accelerates rapidly. The conclusions also indicate that in the corrosive soil environment, the corrosion and failure of galvanized flat steel could affect the function and lifespan of grid.

Keywords power system; grounding electrode; galvanized flat steel; soil corrosion

0 引言

接地装置的正常运行是保证电网和电气设备安全运行的重要保证, 一旦发生接地装置事故, 将会造成地电位升高,

对站用设备产生电位“反击”, 严重情况下, 可能摧毁电网中的直流、保护、通信、低压线路等二次低压设备, 有的甚至发展成更严重的线路系统事故, 给社会带来巨大的损失。一般

收稿日期: 2011-03-15; 修回日期: 2011-09-28

基金项目: 国家电网公司 2009 年度科技项目 (5226ky100022)

作者简介: 王森, 高级工程师, 研究方向为高电压技术, 电子邮箱: wangsen01@yahoo.com.cn

情况下,为增强接地电极的散流效果,并使其具有一定的防腐效果,变电站接地电极常用镀锌扁钢制作。但由于镀锌扁钢镀层较薄,在运输和电极制作过程中极容易出现电镀层损伤的情况,从而使得埋设在地中的镀锌扁钢以表面破损点为腐蚀中心,腐蚀物质促使镀锌层逐渐脱落,加大了接地电极的腐蚀速率。据对某电网公司 750kV 变电站接地网开挖检查表明,埋深为 1.2m 的 60cm×8cm 的水平段镀锌扁钢 5 年后平均 50% 的表面镀锌层已经脱落,垂直段镀锌扁钢 5 年后平均 90% 的表面镀锌层已经脱落。镀锌扁钢镀层脱落后,接地电极的腐蚀速率将大大提高,从而给整个变电站系统带来潜在隐患,因此必须对接地镀锌扁钢的腐蚀行为进行分析研究,为科学评估接地电极寿命提供理论支持。

接地电极作为接地装置中最重要的组成部分,常常深埋于土壤中,土壤腐蚀成为影响接地电极寿命最主要的因素之一^[1-3]。接地电极材料在土壤中的腐蚀,受众多因素的影响,如含水量、含盐量(包括 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 等)、电阻率、pH 值、土壤的氧化还原电位、杂散电流、土壤微生物等^[4]。这些因素或单独起作用,或几种因素联合起作用,从而影响了接地材料的腐蚀特性。

目前已有一些关于接地电极的耐腐蚀性能的分析 and 测试方面的研究结果,大部分对接地电极的研究都是基于实验室的模拟,且采用的是溶液体系环境,这与实际的土壤环境体系有较大的差别,同时关于接地电极腐蚀方面的研究也较为粗略^[5-7],目前很少有对镀锌扁钢接地极在土壤中长期使用后的腐蚀失效原因、腐蚀类型和机理相关的研究报道。本文通过金相、扫描电镜、能谱和 X 射线衍射等测试手段对实际电网中服役 11 年后的镀锌扁钢接地电极,进行了宏观分析、组织分析、腐蚀产物分析和断口分析,并系统研究了电力系统接地用镀锌扁钢的服役行为,为镀锌扁钢接地电极在安全服役过程中的检测与寿命评估奠定了研究基础。

1 腐蚀检测与结果

1.1 宏观观察

图 1(a)、1(b)为接地材料正、反面的腐蚀宏观形貌图。可以看出,服役 11 年后的镀锌扁钢表面几乎没有镀锌层存在。原始厚度为 0.4cm 的接地镀锌扁钢,最薄的处仅为 0.1cm,表面腐蚀严重。

镀锌扁钢表面均发生了腐蚀,腐蚀层薄厚度不均匀。其表面覆盖有一层较厚的腐蚀产物,局部区域带有土壤黏土层,部分表面腐蚀产物有的由于比较疏松而产生剥落。

影响锌和镀锌钢土壤腐蚀行为的因素有许多,锌的腐蚀速度随土壤化学和物理性质变化能产生剧烈的变化^[4-5]。鉴于土壤是高度非均相环境,土壤中的腐蚀沿着金属表面很少呈现均匀状态。锌在通气差的土壤中腐蚀较快,在通气较好的土壤中腐蚀一般较慢,但含有高浓度氯化物和硫酸盐且通气较好的土壤环境仍会诱发深度点蚀。

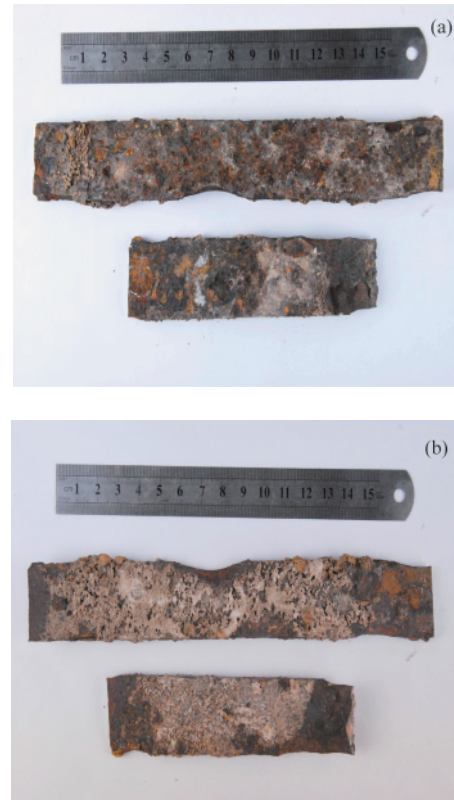


图 1 某电网高压接地电极宏观腐蚀形貌正面 (a) 和反面 (b)

Fig. 1 Macroscopic corrosion morphology of grounding electrode for a high voltage power grid obverse side (a), reverse side (b)

1.2 组织分析

由于腐蚀后的接地导体检测不到镀锌层,因此采用金相显微镜和扫描电子显微镜观察并检测了镀锌扁钢基体的冶金质量。对服役后金属的截面和横断面进行取样,经 SiC 砂纸打磨至 2000# 并抛光后,用 4% 硝酸酒精溶液进行浸蚀。在光学显微镜和电镜下进行观察,结果表明,镀锌扁钢的基体组织为典型的铁素体加珠光体组织,黑色的片状珠光体比较均匀地分布在白色的铁素体中,如图 2 所示。

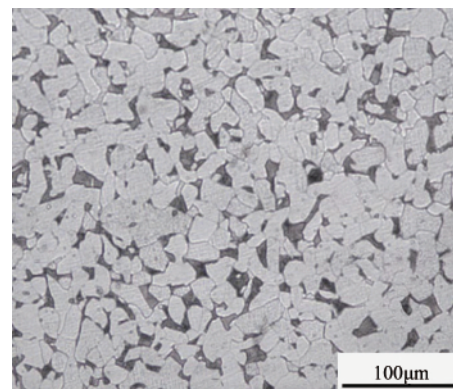


图 2 镀锌扁钢基体的显微组织

Fig. 2 Microstructure of the galvanized flat steel matrix

用扫描电镜分别对抛光后的试样和浸蚀后样品的夹杂物进行显微观察,背散射照片如图 3 所示。可以看出,接地极材料基体存在较多的条状夹杂物。

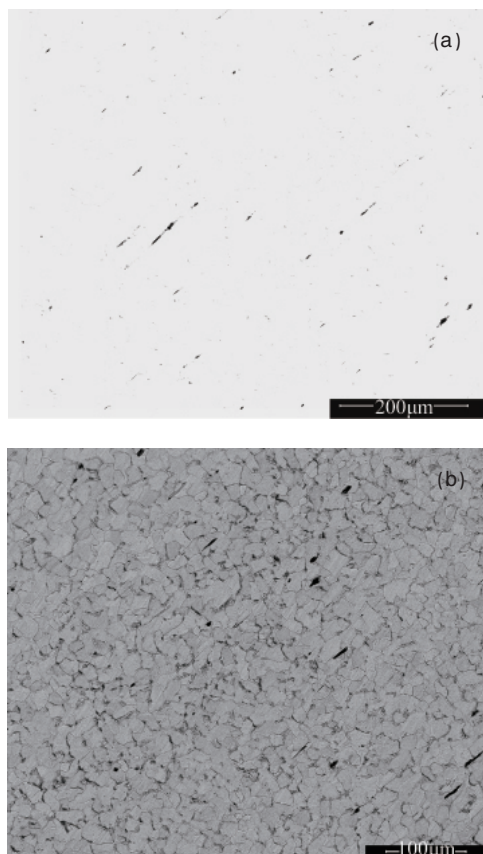


图 3 镀锌扁钢基体的夹杂物形态未浸蚀 (a), 浸蚀 (b)
Fig. 3 Inclusions of the galvanized flat steel matrix without etching (a) and etching (b)

用扫描电镜和能谱进行夹杂物分析,图 4 所示为图 3(b) 区域中的局部放大图,能谱的数据如图 4(b)所示,主要含有硅、铝、氧的不变形夹杂物。部分夹杂物已经从基体脱落而成为孔洞,部分呈现为半脱落状态。这些夹杂物的存在往往会成为材料内部腐蚀的起源。

1.3 腐蚀产物分析

将带有锈层的试样进行观察和分析,图 5(a)和图 5(b)分别为锈层模截面和表面的微观形貌图。从图 5(b)中可以看出锈层呈现 3 层覆盖在基体上,表面锈层比较疏松,且高低不平,在外界的作用下,容易脱落,中间锈层稍微致密,内锈层最为平整、致密且与基体的结合度较好。

对锈层主要成分取样进行 X 射线衍射分析,分析结果见图 6。从图 6 中可以看出,锈层的主要成分为 FeOOH 、 Fe_3O_4 和 CaCO_3 。其中铁的氧化物为腐蚀产物的主要成分,碳酸钙之类的主要为泥沙和土壤混合在腐蚀产物中。

由于 FeOOH 是不导电的相,当 Fe_3O_4 或 Fe_2O_3 等产物不直接与金属基体相接触时,阴极反应 ($\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$) 和

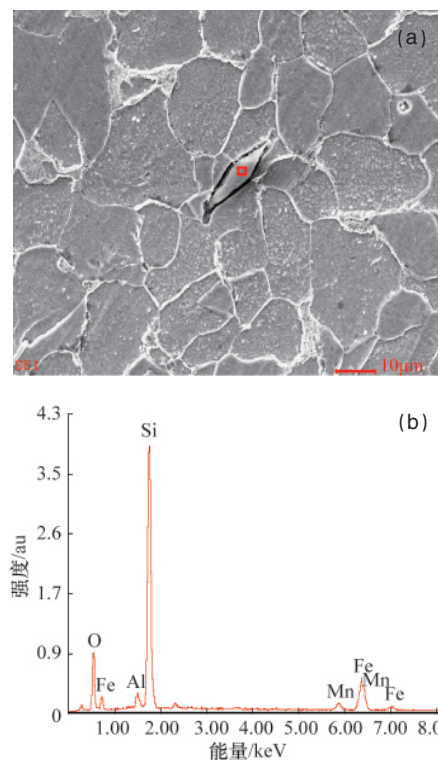


图 4 镀锌扁钢基体中夹杂物形貌 (a) 和能谱数据 (b)
Fig. 4 Morphology of inclusions in galvanized flat steel matrix (a) and the EDS result (b)

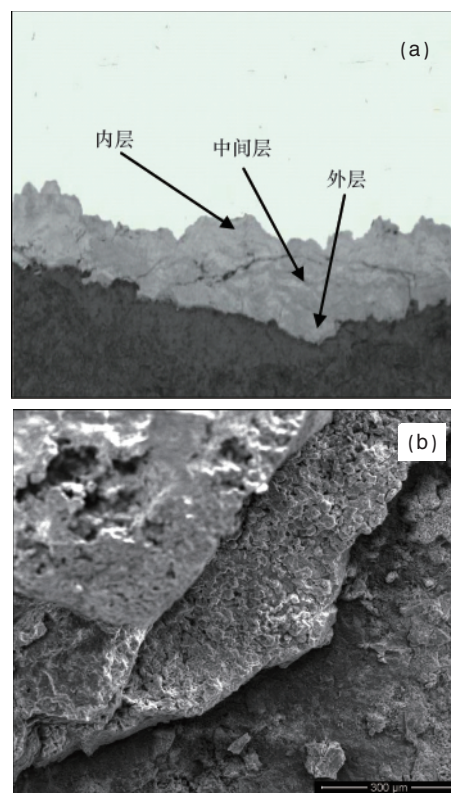


图 5 镀锌扁钢表面锈层的形貌图截面 (a) 和表面 (b)
Fig. 5 Surface morphology of galvanized flat steel rust layer cross-section (a) and surface (b)

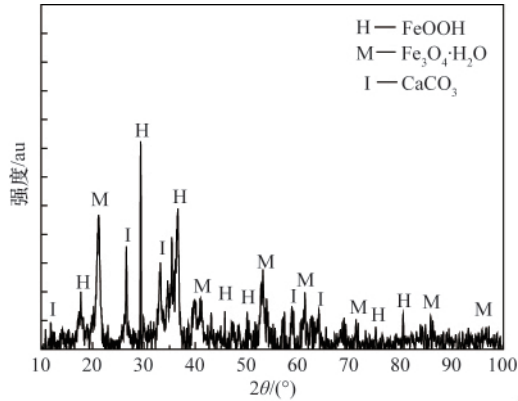


图 6 镀锌扁钢腐蚀产物的 X 射线衍射图
Fig. 6 XRD result of the corrosion products of galvanized flat steel

阳极反应 ($\text{Fe}=\text{Fe}^{2+}+2\text{e}^{-}$) 发生在腐蚀产物/基体界面上,受土壤中的氧和 pH 值影响,新的腐蚀产物可能沉积在金属/腐蚀产物层界面或腐蚀产物开裂处。

图 7(a)为锈层的形貌图,对接近基体部位的锈层进行能谱分析,分析结果见图 7(b)。从图 7(b)中可以看出,接近基体表面的锈层中主要是含有 Fe、O, 同时还有一些 S 和 Cl 等元素。S 元素和 Cl 元素的存在会加剧扁钢材料的腐蚀效应。

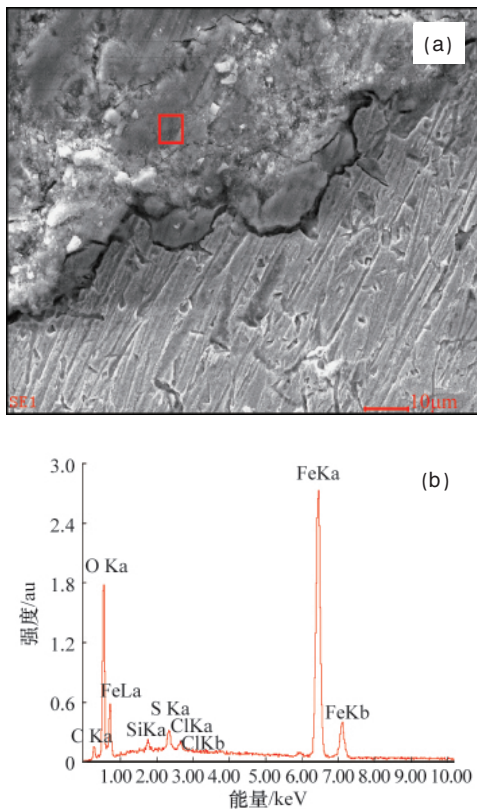


图 7 镀锌扁钢锈层的形貌图 (a) 和腐蚀产物能谱 (b)
Fig. 7 Rust layer morphology (a) and EDS of the corrosion products (b) of galvanized flat steel

1.4 断口形貌分析

图 8 所示的是接地电极材料的断口形貌,从图中可以看出,断口主要出现大量的韧窝,表现为韧性断裂。由于材料内部的裂纹通常在夹杂物界面和两相界面形核,在受力状态下,比较容易变形的金属基体产生的塑性流变,经过不易变形的夹杂物界面时,便产生位错塞积和应力集中,当应力集中大到足以分离两相界面时,裂纹便在界面形核。裂纹一旦形核,由于裂纹尖端处的金属基体塑性较高,其应力集中通过范性变形而松弛。这样裂纹尖端的金属基体产生流变和滑移。当其结合强度小于应力时,裂纹便连接起来,使其主裂纹不断向前扩展。微裂纹形核后,由于周围位错运动,微裂纹钝化成空洞,空洞相互连接,导致韧窝断口^[8]。

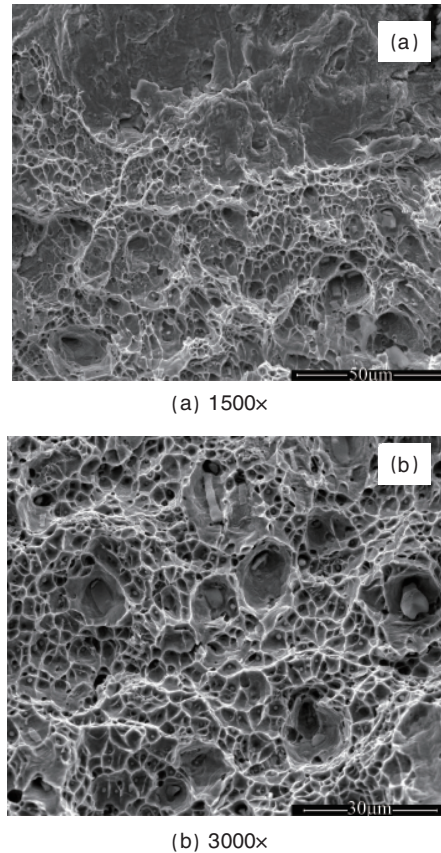


图 8 镀锌扁钢的断口形貌
Fig. 8 Fracture surface of galvanized flat steel

在韧窝处还发现较多的孔洞和一些夹杂物,孔洞和夹杂物的形貌如图 9 所示,这些呈颗粒状的夹杂物表面非常光滑,与基体周围的组织没有任何黏接。夹杂物和夹杂物周围处能存在一定的电位差,从而引起材料的电偶腐蚀,如果再加上环境中一些离子的作用,更容易引起材料的腐蚀。

此外,在材料内部断口处的一些极其微小的区域中,发现存在少量的腐蚀产物,如图 10 所示。从图中可以看出,在材料断口的内部有少量腐蚀产物的沉积,这说明一些腐蚀性的离子已经穿过金属表面,进入材料的内部,在腐蚀介质、环境的共同作用下,内部也开始发生腐蚀。

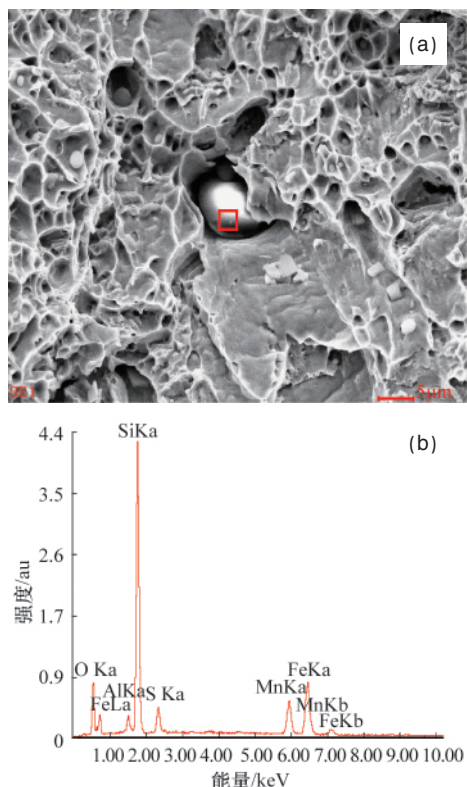


图9 镀锌扁钢断口中发现的夹杂物形貌 (a) 和能谱 (b)

Fig. 9 Inclusions in the fracture surface (a) and the EDS result (b) of the inclusions

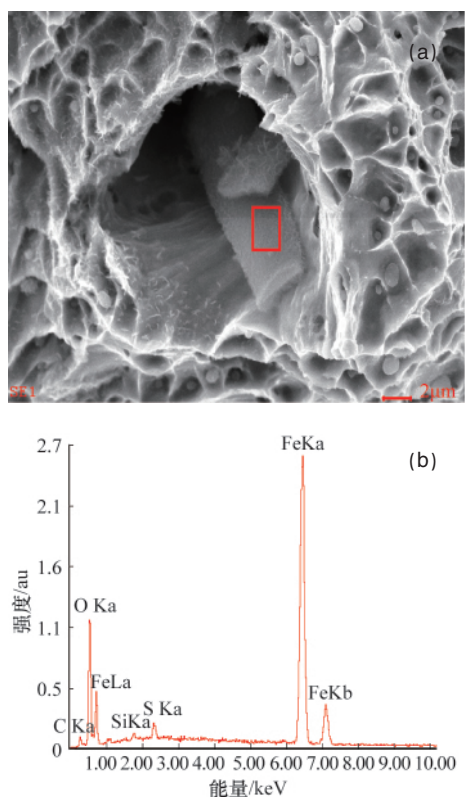


图10 镀锌扁钢断口处腐蚀产物形貌 (a) 和能谱 (b)

Fig. 10 Morphology of corrosion products in the fracture surface of galvanized flat steel (a) and the EDS result (b)

2 分析和讨论

在土壤环境中,常见金属都会发生腐蚀^[9-10],这是由于土壤中含有各种可溶性盐或酸、碱性物质(例如石灰、硝酸盐等),它们都会对金属材料产生不同程度的侵蚀作用,具体情况与土壤成分和季节有关。对该腐蚀接地材料所在地区的土壤取样分析,分析结果发现该地区的土壤中含有较多 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等离子,且土壤呈碱性,而在碱性的环境中,金属也会产生严重的腐蚀。

接地金属材料的腐蚀主要分为自然腐蚀和杂散电流腐蚀^[11-12]。首先接地金属体被埋入地下时,由于它会与附近的其他金属物质形成电位差,而形成腐蚀电池。电位低的金属构成了腐蚀电池的阴极,电位高的金属则构成了腐蚀电池的阳极。在电池电动势的作用下,就会有电子从腐蚀电池的阴极流向腐蚀电池的阳极。在原电池电动势的作用下,将会有电子由原电池的阴极经过土壤流向原电池的阳极。在电子不断从原电池的阴极流向阳极时,阴极金属则变为正离子溶解于电解溶液中,受到了自然腐蚀。而且该接地材料所用的镀锌扁钢中含有较多的夹杂物,这也导致了材料内部本身有电位差,容易发生电偶腐蚀。

其次,由于在日常生活中总会存在泄漏电流^[13-14](或不平衡电流),从不同的电气设备流到大地中,然后再通过土壤回到负极的情况发生。由于电流在土壤中会寻找电阻小的地方通过,因此当泄漏电流通过接地金属材料流出时,由于电解的作用使其金属表面失去电子而受到腐蚀。在土壤腐蚀性较严重的地区,为了延长接地网使用寿命,在设计时往往考虑采用镀锌钢,其防腐蚀的原理是锌的腐蚀电位较普通碳钢低,在土壤介质中锌优先腐蚀掉从而保护普通碳钢,达到延长碳钢使用寿命。在没有电流作用下,镀锌钢的使用寿命的确较好。但是作为接地材料,由于要受到接地电流的作用,镀锌钢表面的锌镀层很快就被电解掉,对延长接地网使用寿命实际作用不大。

对接地电极表面进行镀锌处理,可延长其使用寿命,镀锌层对钢基体的保护作用可归结为两个方面:一是镀锌层本身具有防护阻挡作用,更主要的则是镀锌层与钢基体所起的阴极保护作用。但是由于锌在碱性且含有氯离子的土壤中腐蚀速率较快,一旦当锌层破损时,锌层会因与基材构成的电偶对加速锌层腐蚀。由于镀锌层的厚度有限,因此当镀锌层由于腐蚀而失去保护作用时,基体就会受到腐蚀,从而影响接地网的寿命。

镀锌扁钢由于镀锌层的保护作用消失,在土壤中由于或多或少的存在一些细菌,如在硫酸盐还原菌(SRS)的作用下,生成了铁氧化物或氢氧化物的棕褐色腐蚀产物,紧贴碳钢内层为灰黑色硫化亚铁,这些产物在碳钢表面形成形状不规则难以去掉的瘤^[15],图10能谱中硫峰的存在一定程度上提供了硫酸盐还原菌在镀锌扁钢腐蚀中的作用。SRB对金属腐蚀作用的阴极去极化机理为在缺氧条件下,SRB产生阴极去极化作用,使 SO_4^{2-} 被氧化,反应如下。

阴极: $8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow 8\text{H}$

阳极: $4\text{Fe} \rightarrow 4\text{Fe}^{2+} + 8\text{e}^-$

SRB 引起的阴极去极化作用: $\text{SO}_4^{2-} + 8\text{H} \rightarrow \text{S}^{2-} + 4\text{H}_2\text{O}$

水分解: $8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 8\text{H}^+ + 8\text{OH}^-$

腐蚀产物分解: $\text{Fe}^{2+} + \text{S}^{2-} \rightarrow \text{FeS}$; $3\text{Fe}^{2+} + 6\text{OH}^- \rightarrow 3\text{Fe}(\text{OH})_2$

总反应为: $4\text{Fe} + \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeS} + \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{OH}^-$

SRB 的代谢产物与金属基体相互作用, 加速了金属的腐蚀过程。同时由于土壤温度、水分和氧含量的变化, 形成氧浓差腐蚀, 进一步加剧腐蚀效应。

3 结论

本文采用金相、扫描电镜、能谱和 X 射线衍射等分析测试方法, 对电力系统用镀锌扁钢接地电极在土壤中使用长达 11 年后的服役行为进行了研究。通过对材料的宏观分析、组织分析、腐蚀产物分析和断口分析, 系统地得到了镀锌扁钢在土壤中的腐蚀行为和机理, 主要结论如下。

(1) 电力接地用镀锌扁钢的土壤腐蚀以全面腐蚀为主, 腐蚀产物主要由 FeOOH 和 Fe_3O_4 等组成;

(2) 镀锌扁钢基体中夹杂物的存在促进了腐蚀的发生和发展, 并在局部区域内提供了侵蚀性离子渗入基体的通道;

(3) 在腐蚀环境作用下, 镀锌扁钢发生腐蚀, 导致其散流特性减弱, 从而影响接地网的功能和寿命。

参考文献 (References)

- [1] 陈坤汉, 杨道武, 朱志平, 等. 接地网在土壤中的腐蚀特性研究 [J]. 电瓷避雷器, 2008(4): 39-42.
Chen Kunhan, Yang Daowu, Zhu Zhiping, et al. *Insulators and Surge Arresters*, 2008(4): 39-42.
- [2] 刘连春, 马光侠, 王云长. 电力系统铜材接地装置的应用研究[J]. 华北电力技术, 2006(6): 27-29.
Liu Lianchun, Ma Guangxia, Wang Yunchang. *North China Electric Power*, 2006(6): 27-29.
- [3] 吴向东. 500kV 输电线路接地网腐蚀分析及防护措施[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(12): 545-546.
Wu Xiangdong. *Corrosion & Protection*, 2002, 23(12): 545-546.
- [4] 翁羽丰. 接地装置腐蚀分析及材料选用建议[J]. 浙江电力, 2003, 22(4): 54-56.

- Wen Yufeng. *Zhejiang Electric Power*, 2003, 22(4): 54-56.
- [5] 朱忠伟, 吴一平, 葛红花, 等. 变电站接地材料的电解腐蚀 [J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(11): 868-874.
Zhu Zhongwei, Wu Yiping, Ge Honghua. *Corrosion & Protection*, 2010, 31(11): 868-874.
 - [6] 李素芳, 谢雪飞, 陈宗璋, 等. 变电站接地电极的腐蚀与防护研究[J]. 材料保护, 2004, 37(2): 9-11.
Li Sufang, Xie Xuefei, Chen Zongzhang, et al. *Materials Protection*, 2004, 37(2): 9-11.
 - [7] 朱志平, 马骁, 荆玲玲, 等. 变电站土壤腐蚀性评价及接地网金属腐蚀特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2009(4): 18-20.
Zhu Zhiping, Ma Xiao, Jing Lingling, et al. *Insulators and Surge Arresters*, 2009(4): 18-20.
 - [8] Sen P K. Steel grounding [C]. IEEE Conference Record of Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, Chicago, Oct 9-11, 1985.
 - [9] 房文斌, 叶荣茂, 耿耀宏. ZG1Cr18Ni9Ti 钢中央杂物与韧窝断口形貌关系的初步观察[J]. 材料科学与工艺, 1996(1): 65-68.
Fang Wenbin, Ye Rongmao, Geng Yaohong. *Material Science and Technology*, 1996(1): 65-68.
 - [10] 陈健生, 项昌富. 接地网用导电防腐涂料 [J]. 中国电力, 1997, 30(11): 63-66.
Chen Jiansheng, Xiang Changfu. *China Electric Power*, 1997, 30(11): 63-66.
 - [11] Li S Y, Jung S, Park K. Kinetic study on corrosion of steel in soil environments using electrical resistance sensor technique [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2007, 103: 9-13.
 - [12] 徐华. 大型变电站钢材和铜材接地网的性能比较 [J]. 高电压技术, 2002, 30(7): 18-20.
Xu hua. *High Voltage Engineering*, 2002, 30(7): 18-20.
 - [13] Dawalibi F P, Ma J, Southey R D. Behaviour of grounding systems in multilayer soils: A parametric analysis [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, 9(1): 3-7.
 - [14] 宋吟蔚, 王新华, 何仁洋, 等. 埋地钢质管道杂散电流腐蚀研究现状 [J]. 腐蚀与防护, 2009(8): 515-517.
Song Yinwei, Wang Xinhua, He Renyang, et al. *Corrosion & Protection*, 2009(8): 515-517.
 - [15] 王永红, 鹿中晖, 李英志, 等. 成都站金属材料土壤腐蚀原位测试研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(1): 1-4.
Wang Yonghong, Lu Zhonghui, Li Yingzhi, et al. *Equipment Environment Engineering*, 2009, 6(1): 1-4.

(责任编辑 代丽)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。