

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005592

# 金属引下线与柔性石墨接触腐蚀特性研究

张国锋<sup>1</sup> 李景丽<sup>2</sup> 李孟<sup>3</sup>(1.河南四达电力设备股份有限公司 许昌 461500; 2.郑州大学 电气工程学院 郑州 450000;  
3.邢台职业技术学院 电气工程系 邢台 054000)

**摘要:** 为验证石墨基柔性接地装置中石墨基柔性接地体对金属引下线腐蚀行为的影响。通过对镀锌板、铜金属、304 不锈钢 3 种金属与石墨材料连接后进行模拟土壤包覆、强电解质土壤通电流等不同类型的加速腐蚀试验,并采用失重法、XRD 以及极化曲线等方法,研究不同加速腐蚀试验类型对镀锌板、铜、不锈钢 3 种金属腐蚀行为的影响。结果表明,几种金属材料与石墨材料连接后的耐蚀顺序依次为 304 不锈钢>铜金属>镀锌钢,硫酸根离子浓度的增加会加速石墨接地材料对金属接地材料的腐蚀。石墨基柔性接地装置中引下线优选 304 不锈钢或 304 不锈钢与石墨复合材料,镀锌钢表面的腐蚀产物具有明显的层状结构,内层腐蚀产物主要为  $Zn_5(OH)_8Cl_2H_2O$ 、 $Fe_4(OH)_{10}SO_4$ ,外层腐蚀产物的含氧量高,质地较疏松,主要为  $SiO_4$  和 Zn。

**关键词:** 极化曲线;柔性石墨;腐蚀电流密度;镀锌钢;铜金属;304 不锈钢

**中图分类号:** TG17 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.20

## Study on contact corrosion characteristics of metal down lead and flexible graphite

Zhang Guofeng<sup>1</sup> Li Jingli<sup>2</sup> Li Meng<sup>3</sup>

(1. Henan SIDA Power Equipment Co., Ltd., Xuchang 461500, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 3. Department of Electrical Engineering, Xingtai Polytechnic College, Xingtai 054000, China)

**Abstract:** Objective to verify the influence of graphite based flexible grounding body on corrosion behavior of metal down lead in graphite based flexible grounding device. Methods three kinds of accelerated corrosion tests were carried out to simulate soil coating, strong electrolyte soil current and other types of accelerated corrosion tests after connecting galvanized sheet, copper metal and 304 stainless steel with graphite material. The influence of different accelerated corrosion test types on corrosion behavior of galvanized sheet, copper and stainless steel was studied by weight loss method, XRD and polarization curve. Results the order of corrosion resistance was 304 stainless steel>copper metal>galvanized steel. The increase of sulfate ion concentration would accelerate the corrosion of graphite grounding materials to metal grounding materials. 304 stainless steel or 304 stainless steel and graphite composite material is preferred for down lead of graphite based flexible grounding device, the corrosion products on the surface of galvanized steel have obvious layered structure, the main corrosion products of inner layer are  $Zn_5(OH)_8Cl_2H_2O$ ,  $Fe_4(OH)_{10}SO_4$ , and the outer corrosion products have high Oxygen content and loose texture, mainly  $SiO_4$  and Zn.

**Keywords:** polarization curve; flexible graphite; corrosion current density; galvanized steel; copper metal; 304 stainless steel

## 0 引言

接地装置是保证电力系统安全运行必不可少的一部分。但是,由于接地装置长期处于地下环境,金属接地装置不可避免的会发生腐蚀<sup>[1]</sup>。并且,在一些腐蚀性较强的土壤介质中,若接地装置使用镀锌钢作为接地材料,在运行

3~7年后镀锌钢便会发生严重的腐蚀<sup>[2]</sup>,导致接地系统的整体接地电阻升高,从而不能满足在短路大电流冲击下的动热稳定性,一旦电力线路发生短路故障,可能会造成接地电位升高,若高压窜入二次回路,则会造成事故的扩大<sup>[3]</sup>。因此,接地材料的耐腐蚀性对电力线路的安全稳定运行起着举足轻重的作用。

收稿日期:2020-12-22

为了研究金属接地体的腐蚀问题,本文从材料属性的角度出发,利用柔性石墨为基体制备出新型石墨基柔性接地材料<sup>[4]</sup>,制备出的接地材料其电阻率低至 $3 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ ,并且具有极低的温升效应和较小的趋肤效应<sup>[5]</sup>。并且,石墨基柔性接地材料具有与土壤贴合度较高、接地电阻值低、导电性好、降阻效率显著等优良特点,已被广泛的应用于输电线路中<sup>[6-7]</sup>。但是,由于石墨基柔性接地材料制备工艺复杂、原料价格较高、定型能力差,因此在电力工程中为方便定型和节约成本,输电线路的接地引下线部分往往继续使用镀锌钢等金属材料。然而,在石墨基柔性接地装置中,由于镀锌钢与石墨材料的电极电位数值相差较大。在运行一段时间后,与石墨基柔性接地体偶接的镀锌钢会遭受到严重的腐蚀<sup>[8]</sup>。相关研究表明,偶接处的金属接地引下线之所以会发生加速腐蚀的一个关键因素是柔性石墨材料中含有较高的没有挥发掉的硫分子,柔性石墨材料层间中高温膨化后残留的硫分子基团在潮湿的土壤中会形成较强的电解质<sup>[9]</sup>,从而为金属接地引下线和石墨柔性接地体的电偶腐蚀提供先决条件。由于柔性石墨比金属材料的自腐蚀电位高,从而加速了金属材料的电化学腐蚀速度,当金属材料发生腐蚀时会造成金属与石墨间的接触电阻增大,进而使接地电阻逐渐升高,不能为电力系统的安全运行提供可靠的保证。因此,本文研究了土壤中的硫酸根离子浓度对电力工程中常用金属接地材料与石墨接地材料连接后腐蚀行为的影响,并通过电流加速腐蚀试验,验证了不同金属材料的耐电偶腐蚀的能力,根据实验结果为电力工程中选取合适的金属材料用作接地引下线提供理论依据。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

电流加速试验材料包括镀锌钢扁钢(基体为普通碳钢,镀锌层成分是99.85%锌、0.15%铝)、紫铜片、铜包钢扁钢(基体为普通碳钢,镀铜层成分是99.9%的纯铜)、304不锈钢扁钢和石墨基柔性降阻布。

电化学试验用的材料为纯铜片、不锈钢片、锌片以及石墨基柔性降阻布,电化学试样尺寸为 $40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ <sup>[10]</sup>。试样背面与铜片连接后,用环氧树脂板和热熔胶进行密封处理,只露出 $1 \text{ cm}^2$ 的工作面积接触模拟土壤。然后用600#的水砂纸进行打磨处理,使试样暴露出金属表面。最后,用蒸馏水清洗试样表面以去除表面残渣,并用丙酮、无水酒精冲洗干净,之后再用吸水纸进行擦拭,自然晒干待用<sup>[11]</sup>。

外加电流试样尺寸为 $200 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。依次用蒸馏水、酒精清洗镀锌扁钢、不锈钢扁钢、铜包钢扁钢表面除锈,用吸水纸擦拭干净后,放入 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 鼓风干燥箱内烘干至恒重,用电子天平称量后待用<sup>[12]</sup>。

### 1.2 试验介质

#### 1) 基础土壤

为了保证试验结果的准确性,选取华北平原土壤为基础

试验土壤(参照GBW07401土壤成分分析标准物质),以二氧化硅(65%),三氧化二铁(12%)、三氧化二铝(5%)为主要原料,剩余18%的其他物质按照3种主要元素的比例进行分配。

#### 2) 含 $\text{SO}_4^{2-}$ 离子土壤介质的制备

在制备不同 $\text{SO}_4^{2-}$ 离子试验土壤时,在基础土壤中加入蒸馏水使土壤含水率为20%。然后,分别制备出硫酸盐浓度为0.5%、1%、1.5%、2%的试验土壤。

#### 3) 外加电流加速腐蚀土壤介质

试验土壤介质采自河南某地的石英砂,并用目数为10的标准筛进行筛样处理,采用NY T 1121.6-2006第2部分《土壤pH的测定》的方法,在实验室测定土壤介质的pH值。用纯净水配制 $\text{pH}=7$ 的均匀土壤介质,土壤含水率为10%。

## 1.3 试验方法

#### 1) 电化学试验

采用武汉科思特仪器股份有限公司的电化学工作站(CS310H)上进行电化学试验。电化学试验采取三电极体系的测量方法,工作电极为待测试样,辅助电极为铂,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),极化曲线中的电位均为相对于SCE的电位。首先将待测试品放置在模拟土壤介质中静置30 min,然后利用电化学工作站测试工作电极的极化曲线,分别测量镀锌钢扁钢、铜、304不锈钢极化曲线的开路电位,将测得的数据使用origin软件进行拟合分析;极化曲线的电位扫描速率为 $1 \text{ mV/s}$ <sup>[13]</sup>。

#### 2) 外加电流加速腐蚀试验

在对材料进行外加电流加速腐蚀试验时,采用20 V的恒压恒流源对不锈钢扁钢、镀锌钢扁钢、铜包钢扁钢与石墨基柔性接地体偶接后进行通电,试验电路如图1所示。试验电路图中长方形不锈钢箔为回流极,3种装置内的电流保持一致<sup>[14]</sup>。试验时长为20天,试验电流约为6 mA。试验结束后,利用蒸馏水冲洗金属表面的泥土和杂质,并用吸水纸擦拭干净后,再用丙酮除锈,清水冲洗后,放置在 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 鼓风干燥箱内迅速烘干至恒重,用分析天平称重,计算试样的质量损失和平均腐蚀速率。

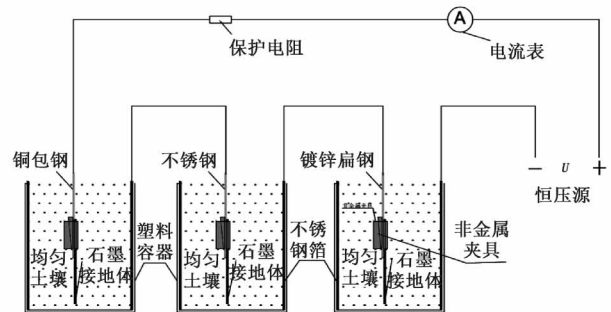


图1 电流加速腐蚀试验装置

## 2 结果及分析

### 2.1 工程应用及腐蚀产物分析结果

某500 kV线路工程接地河南段采用石墨基柔性接地

装置,安装 6 个月后,镀锌钢接地引下线连接板腐蚀情况如图 2 所示,其中,接地引下线中的  $\Phi 12$  镀锌圆钢与石墨基柔性接地体之间采用热镀锌连接板进行过渡连接,热镀锌连接板一端与圆钢引下线采取焊接的连接方式,另一端与石墨基柔性接地体采用压接的连接方式<sup>[15]</sup>。从图 2 可以看到,热镀锌连接板两端均出现严重腐蚀,腐蚀深度较深,且腐蚀位置整体表现为面腐蚀并伴有分层现象,底层表现为黑褐色,质地较硬,表层表现为红褐色,质地较为疏松。同时不难发现,热镀锌连接板中间与石墨基柔性接地体连接,由于密封性较好,隔绝了氧气的介入,并没有出现腐蚀。

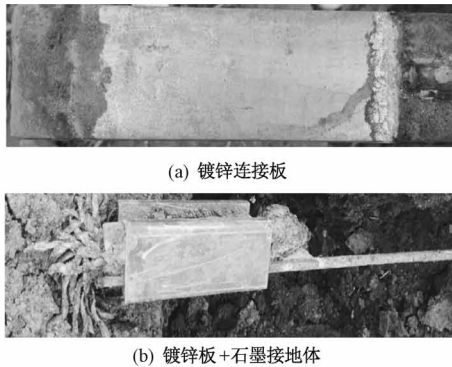


图 2 镀锌圆钢引下线的连接板腐蚀样貌图

图 3 所示为镀锌圆钢引下线的镀锌扁钢连接板与石墨基柔性接地体连接后,在河南某地中强腐蚀环境下热镀锌连接板腐蚀产物的 XRD 分析结果,由图 3 可知,腐蚀产物主要为  $Zn_5(OH)_8Cl_2H_2O$ 、 $Fe_4(OH)_{10}SO_4$ , 其中外层腐蚀产物的含氧量高,质地较疏松。 $Fe_4(OH)_{10}SO_4$  的存在表明  $SO_4^{2-}$  离子参与了金属引下线的腐蚀,这说明  $SO_4^{2-}$  离子的存在会加速了金属引下线的腐蚀。

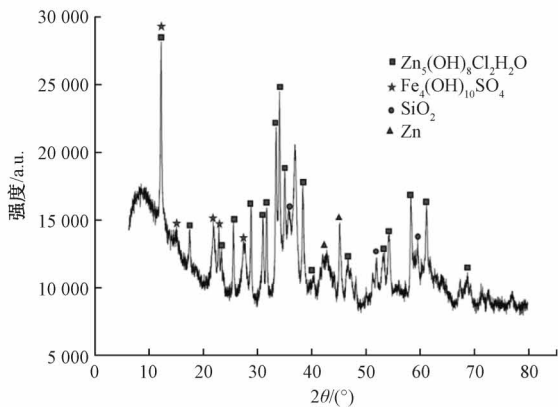
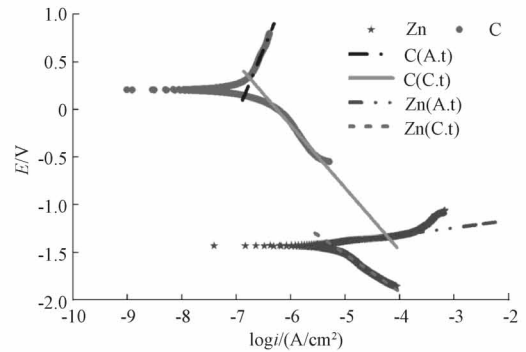


图 3 与石墨材料连接后镀锌板腐蚀产物 XRD 的分析结果

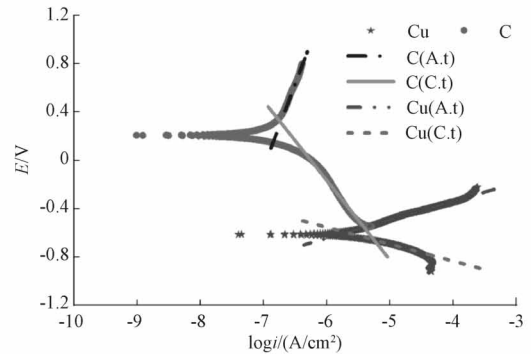
### 2.2 电化学试验结果

根据混合电位理论,对在不同  $SO_4^{2-}$  离子含量的模拟土壤中测得的镀锌钢、紫铜片、304 不锈钢和石墨材料偶接的极化曲线进行 tafel 拟合,根据 tafel 拟合曲线预测上述 3 种金属与石墨布偶接后的电偶电位、电偶电流密度和自

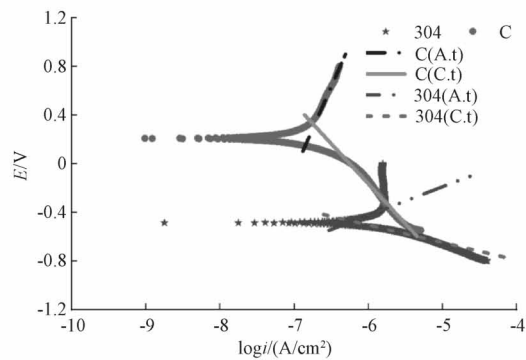
腐蚀电位、自腐蚀电流密度,其拟合图形如图 4 所示。



(a) 镀锌钢与石墨布的极化曲线



(b) 铜片与石墨布的极化曲线



(c) 304 不锈钢与石墨布的极化曲线

图 4 2%  $SO_4^{2-}$  离子含量模拟土壤介质中 3 种金属与石墨布的极化曲线

由图 4 可知,石墨布的电极电位较高,而 3 种金属材料的电极电位较低,因为在腐蚀过程中金属材料会优先发生腐蚀,并且电偶电位的差值大小也影响着腐蚀速度的快慢<sup>[16]</sup>。根据极化曲线可知,镀锌钢、金属铜的阳极极化曲线与石墨基柔性降阻布(简称石墨布)的阴极极化曲线相交于石墨布的阴极氧极限扩散区,在此区域内石墨布的反应阻力较大。电偶交点位于镀锌钢和铜片的阳极区域,这两种金属的电位较负,处于活性溶解状态。由于自制的土壤介质中不含酸性或碱性离子,不考虑酸性或者碱性离子的影响,因此在整个腐蚀反应过程中存在土壤中氧气的参与。而在电偶腐蚀反应的过程中石墨布上发生的反应为吸氧反应,所以整个反应过程会受到阴极反应速度的控制。因此,

表 1 3 种金属在不同  $\text{SO}_4^{2-}$  离子含量的试验土壤中自腐蚀和电偶腐蚀的相关数据

偶接方式	电位及电流密度	$\text{SO}_4^{2-}$ 离子含量			
		0.50%	1.00%	1.50%	2.00%
镀锌钢+石墨布	电偶电位/V	-0.978	-1.012	-1.291	-1.335
	电偶电流密度/ $(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	19.861	31.477	64.269	64.863
	自腐蚀电位/V	-1.207	-1.302	-1.385	-1.394
	自腐蚀电流密度/ $(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	6.508	7.188 8	8.908	10.180 8
铜片+石墨布	电偶电位/V	-0.403	-0.497	-0.624	-0.556
	电偶电流密度/ $(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	2.307	4.656	5.916	3.908
	自腐蚀电位/V	-0.483	-0.558	-0.702	-0.597
	自腐蚀电流密度/ $(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	1.593	1.811	1.914	1.879
304 不锈钢+石墨布	电偶电位/V	-0.023	-0.122	-0.135	0.113
	电偶电流密度/ $(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	0.467	0.493	1.124	0.704
	自腐蚀电位/V	-0.322	-0.451	-0.762	-0.566
	自腐蚀电流密度/ $(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	0.097	0.175	0.184	0.047

在整个反应的过程中镀锌钢和金属铜会成为阳极被加速腐蚀。由于土壤中氧气含量的限制,随着土壤中  $\text{SO}_4^{2-}$  离子的增多,金属铜的腐蚀反应速度并不是一直加快的。当土壤中  $\text{SO}_4^{2-}$  离子含量为 2% 时,铜金属发生钝化,一方面是表面生成的钝化膜阻碍了腐蚀反应的进行,另一方面是阴极材料上发生吸氧反应的速度不足以维持阳极反应,所以腐蚀速度减慢。

由图 4(c)可知,304 不锈钢与石墨布电偶极化曲线的交点位于石墨布的阴极极化曲线上,tafel 拟合曲线的交点位于 304 不锈钢的阳极极化曲线上。因此,当电偶腐蚀发生时 304 不锈钢会优先发生腐蚀,而石墨布会在 304 不锈钢的保护下不发生腐蚀。并且在不同  $\text{SO}_4^{2-}$  离子含量的试验土壤中,304 不锈钢和石墨布的电偶电位非常小。因此可以说明在不同  $\text{SO}_4^{2-}$  离子含量的试验土壤中,304 不锈钢和石墨布发生电偶腐蚀的驱动力较小。

随着模拟土壤介质中  $\text{SO}_4^{2-}$  离子含量的增加,镀锌钢的电偶电流密度和自腐蚀电流密度逐渐增大,铜片和 304 不锈钢的电偶电流密度和自腐蚀电流密度先增大后减小,造成这种结果的原因是模拟土壤介质中加入的  $\text{SO}_4^{2-}$  离子首先改变了试验土壤介质的导电性,其次土壤介质中的硫酸根离子会参与到阳极材料的腐蚀反应中,催化阳极金属材料的反应速度<sup>[17]</sup>。同时也说明在  $\text{SO}_4^{2-}$  离子含量为 2% 的试验土壤中铜金属和 304 不锈钢发生了钝化现象,材料发生腐蚀的趋势变小,材料的腐蚀速度变慢。在同一浓度的土壤介质中,3 种金属与石墨布偶合电流密度从小到大依次为 304 不锈钢、金属铜、镀锌钢。这进一步说明,在不同  $\text{SO}_4^{2-}$  离子含量的模拟土壤介质中,304 不锈钢的腐蚀耐受性能最好。

根据数据表 1 可知,在  $\text{SO}_4^{2-}$  离子模拟土壤中,石墨布与 3 种金属材料偶接时,镀锌钢的最小电偶电流密度  $19.861 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,由标准 HB5374-87 可知,其电偶腐蚀敏

感性可标记为 E 级;当模拟土壤中硫酸根浓度为 0.5% 时,铜片与石墨布的电偶电流密度为  $2.307 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,铜片的电偶腐蚀敏感性为 C 级,随着模拟土壤中  $\text{SO}_4^{2-}$  离子浓度的增加,铜片的电偶腐蚀敏感性缓慢升至 D 级<sup>[18]</sup>;304 不锈钢与石墨布的平均电偶电流密度为  $2.788 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,由标准可知,在模拟土壤中硫酸根浓度为 0.5%~2% 时,304 不锈钢的电偶腐蚀敏感性均为 B 级,由此可知,在硫酸根离子模拟土壤中,石墨布与 3 种金属直接接触时,304 不锈钢最不敏感,这也再次证明,304 不锈钢受石墨材料电偶腐蚀的影响最小。

3 种金属接地材料和石墨材料偶接的电偶腐蚀电流密度均大于其自身的自腐蚀电流密度。因此,金属材料 and 石墨材料在形成偶接时,作为活泼金属材料的腐蚀速度会加快。而在腐蚀介质中,材料的腐蚀电位越低则材料越容易发生腐蚀<sup>[19]</sup>,但是,电偶腐蚀电位高于材料的自腐蚀电位,电偶电流密度却大于自腐蚀电流密度的原因是材料在形成电偶腐蚀后,加快了电子的移动速度而造成了电偶腐蚀速度快于材料自腐蚀速度。因此土壤中或者柔性石墨自身含有的  $\text{SO}_4^{2-}$  离子对电偶腐蚀的影响远大于对金属材料自腐蚀的影响,尤其对镀锌钢的影响最大,铜次之,304 不锈钢最小。

### 2.3 外加电流加速腐蚀试验结果

在电力工程接地应用中,金属接地体的腐蚀是一个比较迟缓的过程,为了能快速的评价金属接地材料与石墨材料连接后金属材料的耐腐蚀性能,在实验室中采用了约 6 mA 的电流加速腐蚀连接件的方法进行加速腐蚀试验,3 种金属分别与石墨材料连接后埋在含水率为 10% 的均匀砂中进行。图 5 所示为镀锌扁钢、304 不锈钢、铜包钢这 3 种金属与石墨连接的连接件在电流加速腐蚀 20 天后的平均腐蚀失重图,304 不锈钢的平均腐蚀速率最小。

图 6 所示为 3 种金属在电流加速腐蚀 20 天后腐蚀宏

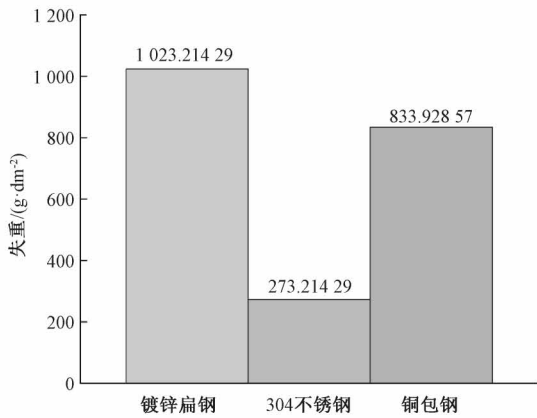
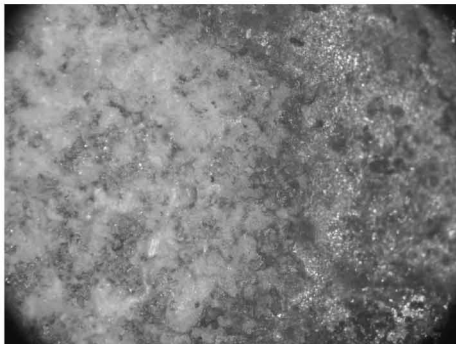
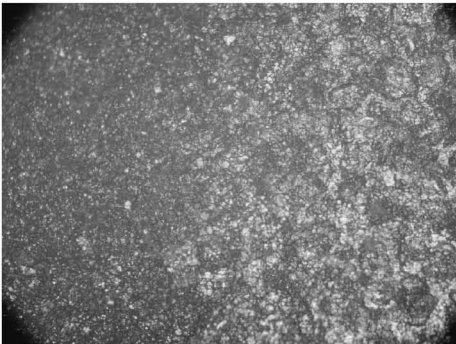


图 5 3 种金属在电流加速腐蚀 20 天后失重数据

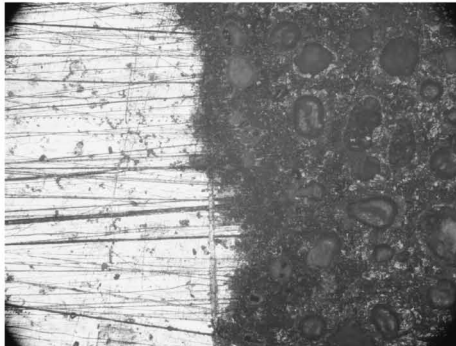
观形貌图。由图 6 可以看出,镀锌扁钢的腐蚀产物是红锈,在与石墨材料连接处(图中下部)的部分腐蚀较为严



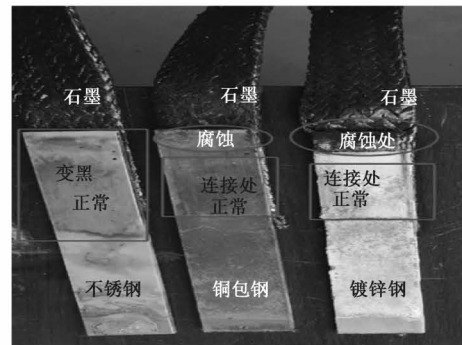
(a) 镀锌钢



(b) 304 不锈钢



(c) 铜包钢



(d) 石墨材料连接

图 6 3 种金属在电流加速腐蚀 20 d 后腐蚀宏观形貌图

重,并且发生了溶解腐蚀,已有部分碳钢基体被腐蚀掉。腐蚀发生后,腐蚀是从试样的边缘往中间开始延伸。在铜包钢表面出现了大量的铜绿,阻止了铜进一步的腐蚀,同时,铜包钢表面变暗,主要为点腐蚀,其整体未见明显的溶解腐蚀,但铜包钢内部所含的普通碳钢的腐蚀较为严重。304 不锈钢整体颜色变暗,但结构完整,这进一步说明金属材料与石墨连接后在长时间通电流的情况下,不锈钢的耐腐蚀性能最优。

### 3 结 论

本文通过电流加速腐蚀试验和真实土壤环境中不同  $SO_4^{2-}$  离子含量下石墨基柔性接地装置搭配使用的 3 种接地引下线材料的耐蚀性能进行对比分析,对工程实际需求开展研究,主要得出以下几点结论。

1) 在电力接地工程应用中,镀锌板与石墨基柔性接地体连接后的腐蚀产物都以  $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ 、 $Fe_4(OH)_{10}SO_4$  等为主。

2) 金属材料与石墨基柔性接地体连接时,  $SO_4^{2-}$  离子会加速金属材料的腐蚀,在相同的  $SO_4^{2-}$  离子浓度下,镀锌钢的耐腐蚀性最差,304 不锈钢的耐腐蚀性最好。在  $SO_4^{2-}$  离子模拟土壤中,石墨布与 3 种金属直接接触时,304 不锈钢腐蚀敏感性最低。

3) 在  $SO_4^{2-}$  离子含量为 2% 的试验土壤中铜金属和 304 不锈钢发生了钝化现象,材料发生腐蚀的趋势变小,材料的腐蚀速度变慢。

4) 在接地工程应用时,应优选硫含量低的石墨基柔性接地材料最为接地装置的接地体。

5) 本文采用强极化曲线方法研究腐蚀电位和腐蚀电流密度,试验误差较大,未来可采用弱极化研究电极的腐蚀电流密度。

### 参 考 文 献

[1] 祝邴伟,潘晨,王振尧. 输电线路杆塔接地装置的腐蚀与防护[J]. 全面腐蚀控制,2015,29(4):44-47,64.  
 [2] 吴育毅,彭敏放,黄欢,等. 应用恒电流暂态测量的接地

- 网腐蚀检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7):145-151.
- [3] 李恒真,黄道春,詹清华,等. 柔性石墨接地体耐腐蚀试验及应用技术研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(4): 98-101,108.
- [4] 张艳,张国锋,胡松江,等. 石墨基柔性接地体及其在通信基站接地网中的应用[J]. 化工新型材料, 2018, 46(7):245-249.
- [5] 韦扬志,丁卫东,张国锋,等. 石墨基柔性接地材料及其在南方复杂地质环境防雷接地的应用[J]. 化工新型材料, 2018, 46(12):252-255.
- [6] 朱义东,王飞,韩洪刚,等. 石墨/玻璃纤维复合接地材料在东北冻土层的应用[J]. 合成纤维, 2019, 48(9): 53-56.
- [7] 胡元潮,阮江军,龚若涵. 柔性石墨复合接地材料及其在输电线路杆塔接地网中的应用[J]. 电网技术, 2014, 38(10):2851-2857.
- [8] 李孟,李素娟,务孔永,等. 石墨基柔性接地体电阻率及外部环境的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(3): 175-181.
- [9] 吴素云. 柔性石墨材料硫含量对金属电化学腐蚀影响的试验研究[J]. 液压气动与密封, 2014, 34(5):19-21.
- [10] 冯利军,董鹏飞,程正冲. 镀锌板在不同加速腐蚀环境下的腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2017, 46(8):246-253.
- [11] 张仁坤,程红红,吴跃斌,等. 输电铁塔用镀锌钢在不同浓度 NaCl 和 NaHSO<sub>3</sub> 中的腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(6):585-593.
- [12] 聂新辉,郑敏聪,李建华. 铜质接地网材料电化学腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(9):817-819.
- [13] 王春丽,吴建华,李庆芬. 海洋环境电偶腐蚀研究现状与展望[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(5): 416-420.
- [14] 饶斌斌,徐宁,张宇. 柔性石墨接地体与金属接地体的耐腐蚀性对比[J]. 材料保护, 2017, 50(2):87-90.
- [15] 胡元潮. 柔性石墨复合接地材料及其在电力系统中的应用研究[D]. 武汉:武汉大学, 2014.
- [16] 徐小宁. 表面处理对 45# 钢-30% C<sub>f</sub>/Nylon6 复合材料的电偶腐蚀性能的影响[D]. 郑州:郑州大学, 2019.
- [17] 何树全. 20# 钢在大庆典型土壤中的腐蚀规律及预测[D]. 大庆:大庆石油学院, 2007.
- [18] 杨勇进,张晓云,刘明辉. TC4-DT 钛合金与异种材料接触腐蚀与防护研究[J]. 材料工程, 2012(12):55-60.
- [19] 刘磊,刘佰强,姜丹,等. 接地网外加电流阴极保护技术研究与应用[J]. 陕西电力, 2014, 42(2):85-87.

#### 作者简介

张国锋,工学学士,工程师,主要研究方向为石墨接地材料的开发、测试技术。

E-mail: zgf604hh@sina.com