

Q235 钢-紫铜在不同温度酸性红壤中的电偶腐蚀行为

刘欣¹, 朱亦晨², 裴锋¹, 张诗雨², 刘光明²

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 南昌 330096;

2. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063)

摘 要: **目的** 研究 Q235 钢-紫铜电偶对在不同温度红壤中, 电偶腐蚀的加速效应和腐蚀机理。**方法** 通过恒温恒湿箱模拟不同温度的酸性红壤环境。采用失重法测定 Q235 钢-紫铜电偶对的电偶腐蚀动力学曲线, 采用 ZRA 零电阻电流计研究电偶电流和电偶电位随腐蚀时间的变化曲线。通过 XRD、SEM/EDS 检测腐蚀产物的成分和微观形貌。**结果** 电偶腐蚀 20 d 后, 土壤温度为 20、40、60 °C Q235 钢的腐蚀质量损失分别为 0.4276、0.9432、1.4622 g/dm², 电偶腐蚀效应分别为 4.51、2.90、2.56。Q235 钢在酸性红壤中呈局部腐蚀形态, 当土壤温度为 20 °C 和 40 °C 时, 腐蚀产物主要由 FeO、Fe₃O₄ 与土壤颗粒胶结形成, 结构较疏松; 当温度为 60 °C 时, 腐蚀产物主要由 Fe₃O₄ 组成, 结构较致密。随着腐蚀时间的增加, 电偶电位呈现起伏波动, 电偶电流减小。腐蚀 20 d 后, Q235-紫铜电偶对在 60 °C 下的电偶电流 (71.1 μA) 小于 20 °C 下的电偶电流 (336 μA), 电偶腐蚀作用较弱。**结论** 土壤温度越高, Q235 钢腐蚀越严重。腐蚀进行的后期, 温度较高的红壤中, Q235 钢形成的腐蚀产物结构致密, 且土壤氧含量低, 对电偶腐蚀产生抑制作用。

关键词: Q235 钢; 紫铜; 电偶腐蚀; 酸性红壤

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0157-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.021

Galvanic Corrosion Behavior of Q235 Steel-Red Copper in Acid Red Soil of Different Temperatures

LIU Xin¹, ZHU Yi-chen², PEI Feng¹, ZHANG Shi-yu², LIU Guang-ming²

(1.State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

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

ABSTRACT: The work aims to study the acceleration effect and galvanic corrosion mechanism of Q235 steel-red copper in red soil with different temperatures. The environment of acid red soil with different temperatures was simulated by constant temperature and constant humidity box. The galvanic corrosion kinetics curves of the Q235 steel-copper were measured by weight-loss method. The zero resistance galvanometer (ZRA) was used to study the variation curves of the galvanic potential and galvanic current with the corrosion time. Microstructure, composition and phase of the corrosion products were analyzed

收稿日期: 2018-06-11; 修订日期: 2018-07-18

Received: 2018-06-11; Revised: 2018-07-18

基金项目: 国家电网公司科技项目 (52182017000Y)

Fund: Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation (52182017000Y)

作者简介: 刘欣 (1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从研究方向为接地材料腐蚀与防护。

Biography: LIU Xin (1985—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: power grid equipment corrosion and protection.

通讯作者: 刘光明 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Corresponding author: LIU Guang-ming (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection of materials.

with XRD, SEM/EDS, respectively. After 20 d of galvanic corrosion, the galvanic corrosion weight loss of Q235 steel at soil temperature of 20, 40 and 60 °C was 0.4276, 0.9432 and 1.4622 g/dm² respectively, and the galvanic corrosion effect was 4.51, 2.90 and 2.56, respectively. Q235 steel exhibited local corrosion in the acid red soil. The corrosion products were mainly composed of FeO and Fe₃O₄, cemented with soil particles and the structure of the corrosion products was loose when the temperature was 20 °C and 40 °C. The corrosion products were mainly composed of Fe₃O₄ when the temperature was 60 °C and the structure of the corrosion product was dense. As the corrosion time increased, the galvanic potential fluctuated and the galvanic current decreased. The galvanic current of Q235 steel-red copper at 60 °C (71.1 μA) was lower than that at 20 °C (336 μA) for 20 days. The corrosion became worse as the temperatures of soil increased. In conclusion, the corrosion of Q235 steel is worse as the soil temperature is higher. In the later period of corrosion, the oxygen content in the soil with higher temperature is lower and the structure of the corrosion product is more compact, so the galvanic corrosion process is inhibited.

KEY WORDS: Q235 steel; red copper; galvanic corrosion; acid red soil

变电站的接地网装置埋设于地底,不断地遭受着土壤的侵蚀作用,威胁着电力系统的安全运行^[1-3]。在我国,碳钢是使用量最大的接地金属材料,但酸性红壤的腐蚀性强,碳钢在酸性红壤中的腐蚀问题严重。为延长接地网服役寿命,目前在酸性红壤中常采用镀锌钢和铜覆钢作为接地材料。由于铜覆钢存在异种金属相接触,其破损处和接头处都会导致偶接的金属中电位较负的金属被加速腐蚀。受季节更替、大电流冲击等因素的影响,土壤的温度并不恒定,温度变化导致土壤中的氧含量、离子反应能力和微生物活动等发生改变,进而影响金属的电偶腐蚀行为^[4-7]。目前,国内外开展了许多电偶腐蚀的相关研究^[8-10]。SHI P 等^[9]研究了 2A12 铝合金与 40CrNiMoA 钢在不同浓度溶液、pH 值和拉伸应力水平下的电偶腐蚀行为。孙禹宏等^[10]研究了不同阴阳极面积比钛合金-95#钢电偶对在 NaCl 溶液中电偶腐蚀行为的差异。目前关

于环境温度对电偶腐蚀影响的研究相对较少,因此研究不同温度土壤中 Q235 钢-紫铜的电偶腐蚀行为对于铜覆钢的应用具有重要意义。

文中通过恒温恒湿箱模拟不同温度的酸性红壤环境,研究了 Q235 钢与紫铜偶接后的电偶腐蚀行为,探究了环境温度对电偶腐蚀行为的影响规律。

1 试验

1.1 试验土壤及材料

实验采用的红壤取自江西省赣州市七里变电站附近,经化验,其主要离子含量及理化参数见表 1。采集的土样置于 110 °C 烘箱中干燥 6 h,经研磨后过 20 目筛,然后按比例加入蒸馏水配制得到含水量(质量分数)为 30%的实验土壤。

表 1 酸性红壤的理化性质
Tab.1 Chemical compositions of red soil

$c(\text{SO}_4^{2-})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$c(\text{Cl}^-)/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1})$	$c(\text{HCO}_3^-)/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	pH	Water content/%
0.012	0.0025	1.536	1.035	5.90	14.16

实验选用的阳极材料为 Q235 钢,阴极材料为紫铜,试片尺寸为 50 mm×50 mm×2 mm。阴、阳极试片均用 400#~800#的金相砂纸逐级打磨,并进行除油和除锈处理,然后在试片顶部点焊铜导线进行偶接。阴阳极板均裸露正对面作为工作面,其余表面用环氧树脂封严,控制电偶对阴阳极面积比为 1:1,试片暴露表面积为 25 cm²。

1.2 试验方法

土壤腐蚀试验在 LHS-70C 型恒温恒湿箱中进行,实验温度分别设置为 20、40、60 °C,相对湿度为 100%。采用如图 1 所示的电偶腐蚀试验装置进行实验, Q235 钢与紫铜偶接后平行放置于实验土壤中,试片顶端引出的铜导线分别与 ZRA-2 型零电阻电流计的正负极相连,控制电偶对偶间距为 5 cm。腐蚀

试验周期为 20 d,每隔 2 d 用电流计记录一次电偶电流和电偶电位。每隔 5 d 取出 Q235 钢试片,用分析天平称量,获得腐蚀动力学曲线。腐蚀周期结束后,

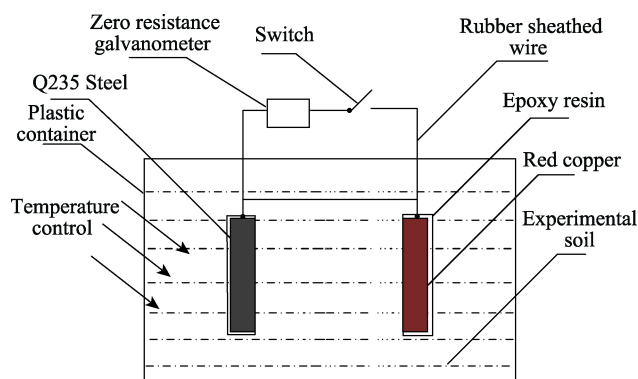


图 1 电偶腐蚀实验装置

Fig.1 Schematic drawing of the galvanic corrosion device

通过 XRD、SEM/EDS 对腐蚀产物的成分和微观形貌进行检测分析。

2 试验结果

2.1 腐蚀动力学

图 2 为 Q235 钢与紫铜偶接后在不同温度红壤中的电偶腐蚀动力学曲线。从图 2 可见, Q235 钢在不同温度红壤中均有不同程度的质量损失, 且土壤温度越高, 腐蚀质量损失越大。这是因为随着温度的升高, 土壤中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等侵蚀性阴离子活性增强, 金属表面双电层结构对腐蚀反应的阻碍能力减弱^[1]。同时, 温度升高也使得氧在土壤中的扩散能力增强, 促进了电极反应的进行, 导致腐蚀加重。

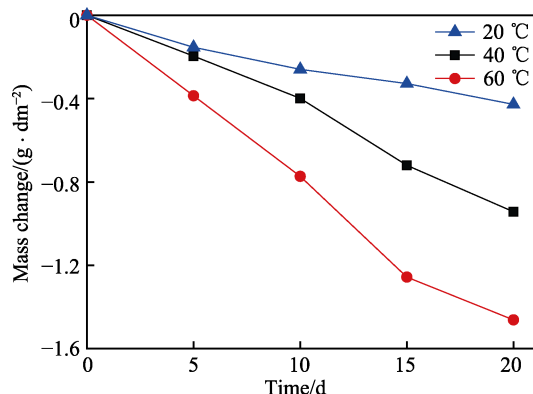


图 2 Q235 钢在不同温度红壤中的电偶腐蚀动力学曲线
Fig.2 Galvanic corrosion kinetics curves of Q235 steel in red soil with different temperatures

图 3 为 Q235 钢与紫铜偶接前后在不同温度红壤中腐蚀 20 d 后的质量损失对比。从图 3 可见, 与紫铜形成电偶对后, Q235 钢腐蚀质量损失明显增加, 电偶腐蚀作用促进了腐蚀反应的进行。通常采用电偶腐蚀效应 γ 来表示电偶腐蚀加速效果的强弱, 其计算公式见 (1) 式。

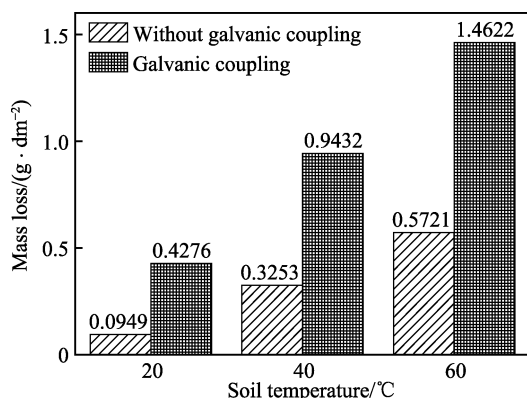


图 3 Q235 钢与紫铜偶接前后在不同温度红壤中腐蚀 20 d 后的失重对比
Fig.3 Mass loss of Q235 steel with and without galvanic corrosion for 20 days

$$\gamma = \frac{\Delta m'_A}{\Delta m_A} \quad (1)$$

式中: Δm_A 和 $\Delta m'_A$ 分别为电偶对中对阳极材料偶接前后单位面积上的腐蚀质量损失。由计算结果可知, 土壤温度为 20、40、60 °C 时, Q235 钢-紫铜电偶对的电偶腐蚀效应 γ 分别为 4.51、2.90 和 2.56。随着温度升高, γ 反而降低。

2.2 微观腐蚀形貌及腐蚀产物

图 4 为不同温度下 Q235 钢电偶腐蚀 20 d 后表面腐蚀产物的 XRD 图谱。从图 4 可见, 温度为 20 °C 和 40 °C 时, Q235 钢中的 Fe 主要被氧化成 FeO 和 Fe_3O_4 , 而在 60 °C 时, 腐蚀产物以 Fe_3O_4 为主。图 5 为 Q235 钢-紫铜电偶对在不同温度红壤中电偶腐蚀 20 d 后 Q235 钢表面的微观形貌及能谱图。从图 5 可见, 20 °C 时, Q235 钢表面覆盖着较疏松的腐蚀产物 (图 5a 中箭头所示), 腐蚀形貌以局部腐蚀为主。结合 XRD 分析结果可知, 这些腐蚀产物由铁的氧化物与来自土壤中的 SiO_2 相互胶结形成。在 40 °C 时, Q235 钢表面的腐蚀产物与 20 °C 时基本一致, 突起状腐蚀产物附着于 Q235 钢表面, 且能明显观察到腐蚀产物剥落的痕迹 (图 5b 中箭头所示)。在 60 °C 时, 腐蚀产物主要为 Fe_3O_4 , 其结构较为致密, 呈片状附着于 Q235 钢表面 (图 5c 中箭头所示), 其中基体峰较强, 说明有腐蚀产物剥落。

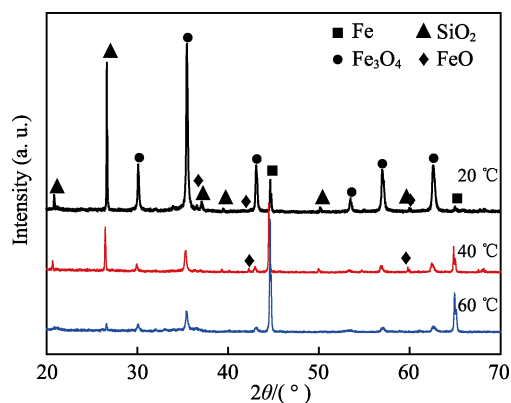


图 4 Q235 钢在不同温度红壤中电偶腐蚀 20 d 后表面腐蚀产物的 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of Q235 steel after galvanic corrosion in red soil with different temperatures

2.3 电偶腐蚀测试 (ZRA) 结果

图 6 是不同温度红壤中 Q235 钢-紫铜电偶对的 E_g-t 曲线。 E_g 的大小主要与电极表面的状态有关, 反映的是电偶腐蚀进行的热力学倾向。从图 6 可见, Fe-Cu 电偶对的 E_g 呈波浪状起伏, 且随着腐蚀反应的进行而逐渐降低。在电偶腐蚀初期, 由于电偶腐蚀的加速作用, 电极表面状态变化较大, E_g 呈现波动起伏变化。腐蚀进行的后期, 腐蚀产物在 Q235 钢表面积

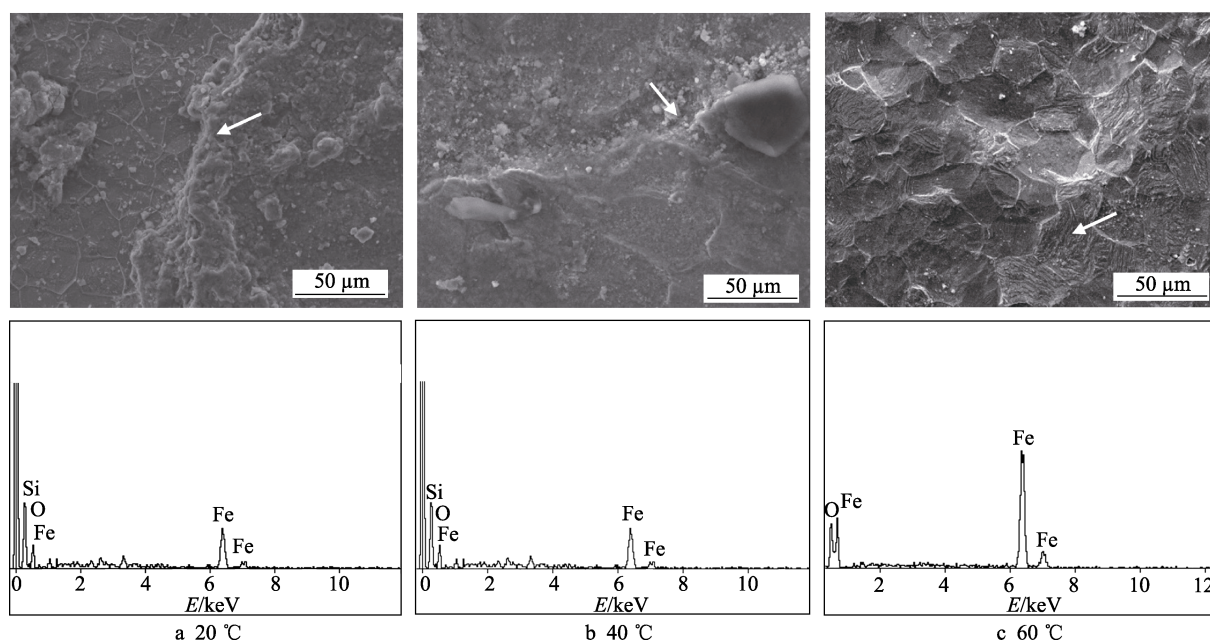


图5 不同温度红壤中 Q235 钢电偶腐蚀 20 d 后的表面形貌及对应 EDS 图

Fig.5 Corrosion morphologies and corresponding EDS spectra of Q235 steel after galvanic corrosion for 20d in red soil with different temperatures

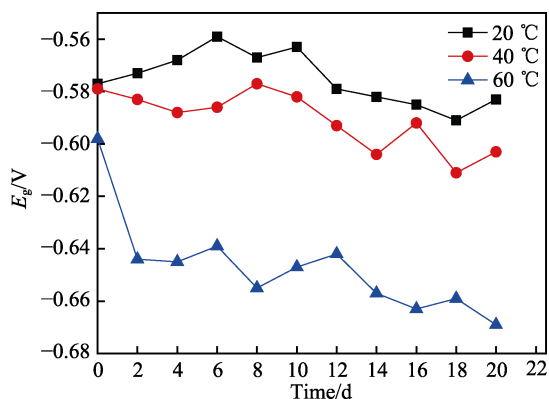


图6 不同温度红壤中电偶电位 E_g 随时间的变化曲线

Fig.6 Galvanic potential E_g as a function of time in red soil with different temperatures

累,形成了具有一定厚度的腐蚀产物层,在一定程度上阻挡了 Q235 钢与腐蚀介质的接触,电偶电位逐渐下降并趋于平缓。

图 7 为不同温度红壤中 Q235 钢-紫铜电偶对的 I_g-t 曲线。从图 7 可见,在腐蚀进行的初期, I_g 下降速度很快,腐蚀进行至中期时,出现小幅度上升后又继续下降,并最终趋于平缓。腐蚀刚开始发生时, Q235 钢表面洁净,电偶对间电阻小,故此时的电偶电流 I_g 最大。由于温度越高,土壤中活性阴离子的活动能力越强,土壤的电导率越大,故在腐蚀进行的初期,温度越高,电偶电流 I_g 越大。随着电偶腐蚀的进行, Q235 钢表面的腐蚀产物不断积累,使得阳极的去极化过程受阻, I_g 不断下降。腐蚀过程中,由于生成的腐蚀产物出现脱落,使得电偶对间的电阻降低, I_g 出现小幅度的上升。腐蚀进行至后期时, Q235 钢

表面形成的腐蚀产物逐渐稳定,电偶电流降低速度趋缓。由于 60 °C 下 Q235 钢的腐蚀产物比 20 °C 和 40 °C 下的腐蚀产物结构更为致密,阻挡腐蚀性介质的能力更强,故在腐蚀进行的后期, 60 °C 下的电偶电流反而比 20 °C 和 40 °C 下的小。

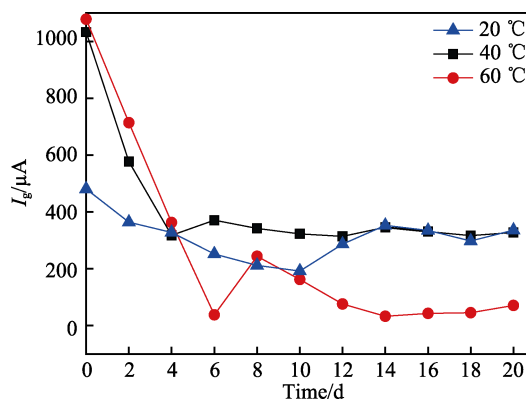


图7 不同温度红壤中电偶电流 I_g 随时间的变化曲线

Fig.7 Galvanic current I_g as a function of time in red soil with different temperatures

3 讨论

研究表明^[12-13],土壤腐蚀进行时,温度主要通过改变阳极的溶解过程、阴极的扩散过程、土壤氧含量、氧气传输能力和离子活动能力对金属的腐蚀过程产生影响。金属腐蚀速率受到两个相对因素的共同作用。一方面,温度升高使得离子的活动能力和氧气的扩散能力增强,有利于电极反应进行。另一方面,温度的升高,使得土壤中溶解的氧气含量降低,阻碍了

阴极反应的进行。同时,在高温下形成的腐蚀产物结构更致密,能有效地阻止基体与腐蚀介质的接触,也对电偶腐蚀过程产生抑制作用。其中,温度与电极反应速度常数的关系可用 Arrhenius 公式^[14]表示:

$$\ln k = -\frac{Ea}{RT} + B \quad (2)$$

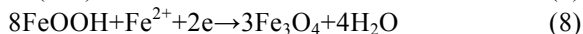
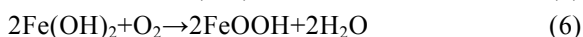
式中: k 为反应速率常数; Ea 为反应活化能。从式(2)可知,随着体系的温度 T 升高, k 增大,电极反应速率增大。在腐蚀反应进行的初期,土壤中溶解氧含量较高,温度的升高有效地促进了土壤中氧的扩散和离子的运动,表现为温度越高,腐蚀越快。当腐蚀进行至后期时,温度较高的土壤中溶解的氧气被大量消耗,仅有少量的氧气能扩散到 Cu 的表面,由于 Fe-Cu 电偶对中 Cu 的表面主要发生氧的还原反应,故在阴极产生氧浓差极化使得腐蚀速率减缓。整体来看,温度对电极反应的活化作用在整个腐蚀过程当中占主导地位,故表现为温度越高,腐蚀质量损失越严重。

温度对腐蚀产物的影响表现为温度越高, Q235 钢腐蚀产物越稳定,且结构更致密。Q235 钢-紫铜电偶对中, Q235 钢作为阳极主要发生铁的溶解反应,紫铜作为阴极主要发生氧的还原反应,其阴阳极反应式如下。

阳极反应:



阴极反应:



由于腐蚀介质为酸性红壤,紫铜表面吸氧腐蚀产生的 OH^- 一部分与红壤中的 H^+ 发生中和反应,另一部分通过扩散作用向阳极移动。由于土壤的性质及结构存在不均匀性, Q235 钢仅局部区域 pH 值升高,形成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 等难溶的氢氧化物,因此 Q235 钢表现为局部腐蚀形态。当土壤温度为 20 °C 和 40 °C 时,氧气扩散能力较弱, Fe^{2+} 与 OH^- 结合生成的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 一部分分解生成 FeO,与土壤颗粒胶结形成较为疏松的腐蚀产物层,另一部分与氧气反应生成 FeOOH。土壤温度为 60 °C 时,氧气扩散能力较强,按照化学反应方程(5) — (8) 的进一步反应, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 氧化更易转化为 FeOOH。这些生成 FeOOH 最后会继续与阳极溶解产生的 Fe^{2+} 反应,生成结晶性良好的 Fe_3O_4 ^[15]。生成 Fe_3O_4 的自由能远小于 FeO 和 FeOOH,属于热力学中较稳定的状态,具有很高的晶格束缚能,对电偶腐蚀过程产生阻碍作用。因此,从 I_g - t 曲线可见,腐蚀进行到后期时, 60 °C 红壤中 Q235-紫铜电偶对的电偶电流 I_g 仅为 71.1 μA , 小于 20 °C 和 40 °C 下的 336

μA 和 328 μA , Fe_3O_4 腐蚀产物层的形成使得电偶腐蚀速率减缓。

4 结论

1) Q235-紫铜电偶对在温度为 20、40、60 °C 的酸性红壤环境中腐蚀 20 d 后, Q235 钢的腐蚀质量损失分别为 0.4276、0.9432、1.4622 g/dm^2 , 电偶腐蚀效应 γ 分别为 4.51、2.90、2.56。土壤温度升高, Q235 钢腐蚀加重,但电偶腐蚀效应反而有所降低。

2) Q235-紫铜电偶对在不同温度红壤中腐蚀 20 d 后, Q235 钢表面的腐蚀形貌均表现为局部腐蚀。20 °C 和 40 °C 下,腐蚀产物主要由 FeO、 Fe_3O_4 与土壤颗粒胶结而成。60 °C 下的腐蚀产物主要由 Fe_3O_4 组成,结构较致密,呈片状分布于 Q235 钢表面。

3) 温度对电偶电流密度 I_g 的影响表现为: 腐蚀进行的初期,温度越高,电偶电流越大;随着电偶腐蚀反应的进行, Q235 钢表面腐蚀产物的积累使得电偶电流急剧下降;腐蚀进行的后期,温度 60 °C 的红壤中 Q235 钢生成的腐蚀产物结构致密,对电偶腐蚀产生抑制作用,电偶电流反而最小。

参考文献:

- [1] 闫爱军, 陈沂, 冯拉俊. 几种接地网材料在土壤中的腐蚀特性研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(3): 197-199.
YAN Ai-jun, CHEN Yi, FENG La-jun. Soil corrosion performance of several grounding net materials[J]. Corrosion science and protection technology, 2010, 22(3): 197-199.
- [2] 裴锋, 田野, 刘平, 等. Q235 碳钢在红壤中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(9): 715-719.
PEI Feng, TIAN Ye, LIU Ping, et al. Corrosion behavior of Q235 carbon steel in red soil[J]. Corrosion and protection, 2016, 37(9): 715-719.
- [3] 郭淑琴. Q235 钢和镀锌钢在赣州地区酸性红壤环境下腐蚀行为的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
GUO Shu-qin. Research on the corrosion behavior of Q235 steel and galvanized steel in ganzhou acid red soil environment[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [4] 余建飞, 陈心河, 詹约章, 等. 温度对 Q235 钢在碱性土壤中腐蚀行为的影响[J]. 全面腐蚀控制, 2010, 24(11): 41-44.
YU Jian-fei, CHEN Xin-he, ZHANG Yue-zhang, et al. Effects of temperatures on corrosion behavior of Q235 steel in alkaline soil[J]. Total corrosion control, 2010, 24(11): 41-44.

- 41-44.
- [5] KIM J G, KIM Y W. Cathodic protection criteria of the rmally insulated pipeline buried in soil[J]. Corrosion science, 2001, 43(11): 2011-2021.
- [6] 曹君飞, 陈普信, 徐克, 等. 温度对不同含水率土壤中 Q235 钢腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2008, 41(3): 11-14. CAO Jun-fei, CHEN Pu-xing, XU Ke, et al. Effect of temperature on corrosion behavior of carbon steel in soil with different water contents[J]. Materials protection, 2008, 41(3): 11-14.
- [7] GURRAPPA I, REDDY D V. Characterisation of titanium alloy, IMI-834 for corrosion resistance under different environmental conditions[J]. Journal of alloys & compounds, 2005, 390(1): 270-274.
- [8] 陈兴伟, 吴建华, 王佳, 等. 电偶腐蚀影响因素研究进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(4): 363-366. CHEN Xing-wei, WU Jian-hua, WANG Jia, et al. Progress in research on factors influencing galvanic corrosion behavior[J]. Corrosion science and protection technology, 2010, 22(4): 363-366.
- [9] SHI P, SHUAI M, LIU D, et al. Factors influencing galvanic corrosion behavior[J]. Ordnance material science & engineering, 2013, 36(5): 68-73.
- [10] 孙禹宏, 李竹影, 张旺洲, 等. 钛合金和 95# 钢的电偶腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(2): 7-10. SUN Yu-hong, LI Zhu-ying, ZHANG Wang-zhou, et al. Study on galvanic corrosion of titanium alloy and 95# steel [J]. Equipment environmental engineering, 2014, 11(2): 7-10.
- [11] 聂向晖, 杜翠薇, 李晓刚. 温度对 Q235 钢在大港土中腐蚀行为和机理的影响[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(1): 48-53. NIE Xiang-hui, DU Cui-wei, LI Xiao-gang, et al. Influence of temperature on the corrosion behavior and mechanism of Q235 steel in dagang soil[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(1): 48-53.
- [12] 曹君飞. 温度湿度对在不同腐蚀阶段 Q235 钢土壤腐蚀行为影响的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007. CAO Jun-fei. Effects of temperature and water content on soil corrosion behavior of carbon steel at different exposure time[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [13] LIU Guang-ming, GUO Shu-qin, LI Duo-sheng, et al. Effects of moisture content on soil corrosion behavior of Q235 steel[C]// Proceedings of the 2015 international conference on materials engineering and environmental science. USA: Morehead State University, 2016: 337-343.
- [14] 梁英教. 物理化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989. LIANG Ying-jiao. Physical Chemistry[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989.
- [15] 李健, 苏航, 柴锋, 等. Q235 钢在实际土壤与模拟溶液中的腐蚀行为[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(12): 36-41. LI Jian, SU Hang, CHAI Feng, et al. Corrosion behavior of Q235 steel in actual soil and simulated solution[J]. Journal of iron and steel research, 2014, 26(12): 36-41.