

漏磁场对鹰潭土壤模拟液中管线钢 交流腐蚀行为的影响

杨永¹, 冉文燊¹, 李林涛¹, 孙明¹, 贺小刚²

(1.中国特种设备检测研究院, 北京 100029; 2.北京市特种设备检验检测研究院, 北京 100029)

摘要: **目的** 探究管体磁化产生的磁场对油气管道交流杂散电流腐蚀行为的影响。**方法** 采用自行设计试验装置模拟管道真实漏磁场, 以开路电位、高频电位测量、动电位极化、电化学阻抗谱、表面分析技术及失重法, 研究了鹰潭土壤模拟液中磁化和未磁化的 X52 管线钢试样交流腐蚀行为的差异。**结果** 磁化管体的磁场使交流腐蚀电位先负移后正移, 交流幅值电位增大, 极化电流增加, 反应界面电容减小, 法拉第电阻增大, 交流平均腐蚀速率增大, 对腐蚀产物形貌有一定影响, 但对腐蚀形貌基本无影响。磁场作用机理分析表明, 磁场产生的洛伦磁力驱动反应界面附近腐蚀介质运动而增加反应粒子的扩散速率及减小界面扩散层厚度, 从而增大交流腐蚀速率。磁场梯度力在一定程度上抑制了阳极反应, 促进了阴极反应。**结论** 漏磁场使管线钢交流杂散电流腐蚀速率大幅提升, 但是不改变其均匀腐蚀的形貌, 应提高开展过漏磁内检测的油气管道交流杂散电流评价标准。

关键词: 磁场; X52 管线钢; 交流杂散电流; 腐蚀行为; 鹰潭土壤模拟液

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)05-0189-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.05.018

Effect of Magnetic Field on AC Corrosion Behavior of Pipeline Steel in Simulated Yingtan Soil Solution

YANG Yong¹, RAN Wen-shen¹, LI Lin-tao¹, SUN Ming¹, HE Xiao-gang²

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China;

2. Beijing Special Equipment Inspection and Testing Research Institute, Beijing 100029, China)

ABSTRACT: Alternating current (AC) interference can cause serious corrosion of oil and gas pipelines and thus cause accident. Magnetic flux leakage (MFL) internal detection is currently the most effective and widely used nondestructive technology for detecting metal damage in oil and gas pipelines. The purpose of this study is to explore the effect of magnetic field on the corrosion behavior of X52 pipeline steel caused by AC stray current, mainly including corrosion rate, corrosion potential,

收稿日期: 2022-03-16; 修订日期: 2022-08-29

Received: 2022-03-16; Revised: 2022-08-29

基金项目: 市场监管总局科技计划项目(2019MK136); 中国特检院科研项目(2019 青年 03)

Fund: Science and Technology Plan Projects of State Administration for Market Regulation (2019MK136); CSEI Research Program (2019-Youth-03)

作者简介: 杨永(1978—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为压力管道安全。

Biography: YANG Yong (1978-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: pressure pipeline safety.

通讯作者: 孙明(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为压力管道腐蚀。

Corresponding author: SUN Ming (1988-), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: pressure pipeline corrosion.

引文格式: 杨永, 冉文燊, 李林涛, 等. 漏磁场对鹰潭土壤模拟液中管线钢交流腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 189-196.

YANG Yong, RAN Wen-shen, LI Lin-tao, et al. Effect of Magnetic Field on AC Corrosion Behavior of Pipeline Steel in Simulated Yingtan Soil Solution[J]. Surface Technology, 2023, 52(5): 189-196.

polarization current, corrosion products and corrosion morphology. In order to more realistically simulate the actual situation of the magnetic field generated by the magnetized pipeline, a 10 mm-wide ring was cut from a $\phi 219$ mm \times 6 mm pipe, and 650 turns of insulated copper wire (with a copper core diameter of 0.82 mm) were wound, and a slot was cut into the ring to embed the test sample. During the experiment, a 2 A direct current was applied to the insulated copper wire to simulate the magnetization of the sample, and the magnetic field intensity that was calculated was 1.9 kA/m. Open circuit potential, polarization curves, electrochemical impedance spectroscopy (EIS), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and weight loss tests were used to study the effect of the magnetic field generated by the magnetized oil and gas pipelines on the AC corrosion behavior of the X52 pipeline steel in simulated Yingtan soil solution. The applied magnetic field made the AC corrosion potential move negatively and then positively, increased the AC amplitude potential, increased the polarization current, decreased the reaction interface capacitance, increased the charge transfer impedance and increased the average AC corrosion rate, had a certain effect on the morphology of corrosion products, but basically had no effect on the corrosion morphology. Compared with the case of a direct application of a magnetic field that was perpendicular or parallel to the working surface of an electrode in most studies, the magnitude of the leakage magnetic field that acted on the electrochemical reaction in this study depended on the strength of the magnetic field loaded in the ring and the surface roughness of the sample (equivalent to numerous tiny defects) or the size and shape of the defects. The Loren magnetic force could increase the diffusion rate of solution particles, thereby reducing the Fe^{2+} concentration at the electrode/solution interface and the thickness of interfacial diffusion layer, and eventually increasing the corrosion rate. In a nonuniform magnetic field, the magnetic field gradient force caused paramagnetic ions in a non-uniform magnetic field to move to the high magnetic induction intensity region and the diamagnetic ions to move to the low magnetic induction intensity region. The magnetic field gradient could inhibit local corrosion in corrosion pits to a certain extent because magnetic induction intensity and magnetic field gradient in corrosion pits were higher than other areas. The conclusions of this paper indicate that the evaluation standard of AC stray current corrosion of oil and gas pipelines tested by in-line inspections based on the magnetic flux leakage (MFL) principle should be improved.

KEY WORDS: magnetic field; X52 pipeline steel; AC stray current; corrosion behavior; simulated Yingtan soil solution

随着能源、电力及交通行业的快速发展, 高压输电线及电气化铁路系统与油气管道近距离平行或交叉使交流杂散电流腐蚀成为油气管道安全的潜在危害。国内外已报道多起交流杂散电流引起的油气管道腐蚀事故^[1-5]。试验研究^[6-15]表明, 交流杂散电流会加速油气管道腐蚀, 危及油气管道安全运行。Weng 等^[8]研究发现, Q235 在 Na_2SO_4 溶液中受 115、250 A/m² 交流电流干扰时, 腐蚀速率分别为自然腐蚀速率的 4.4、5.9 倍。Zhu 等^[9]研究显示, X80 钢在仿土壤溶液中受 100 A/m² 交流电流干扰时的腐蚀速率约为自然腐蚀速率 3 倍。Yang 等^[15]研究表明, X100 钢在库尔勒碱性及鹰潭酸性土壤模拟液中受交流电流干扰时, 腐蚀速率都随交流电流密度的增加而增大, 在 200 A/m² 电流密度下分别为自然腐蚀速率的 1.8 和 2.2 倍。相关研究显示, 磁场对金属腐蚀行为具有重要影响, 磁场作用下会产生磁致过电位, 使腐蚀电位正移^[16-18]或负移^[19]。相对试样腐蚀面不同方向的磁场会影响腐蚀试样不同区域的腐蚀严重程度^[20-22], 使局部腐蚀加重或减弱。有研究显示磁场会增大土壤中管线钢的自然腐蚀速率^[23-24], 加重管线钢点蚀和裂纹^[23-24], 但是也有研究显示磁场可抑制碳钢点蚀^[26], 降低碳钢的腐蚀速率^[27]。

近年来漏磁内检测技术已成为检测油气管道金

属损伤最广泛、有效的无损检测方法^[28]。由于漏磁检测时需要对被检测管道进行饱和磁化, 所以管道在漏磁内检测实施过程及之后相当长的时间内都会具有磁性^[25]。鹰潭酸性土壤是中国东南地区的典型土壤类型, 温度较高、含水率高、土壤致密、呈酸性 (pH 为 3~5), 具有较大的腐蚀性^[29]。当管线钢在鹰潭酸性土壤环境中受交流杂散电流腐蚀时, 由于腐蚀电流的增大, 其反应控制步骤由电子转移控制向混合控制转变^[13,30]。多项研究表明, 磁场会对扩散控制的反应具有重要的促进作用^[31-33], 理论上磁场会对交流腐蚀产生一定的影响, 但目前尚未见漏磁场对油气管道交流腐蚀行为影响的公开研究报道。

本文使用专门设计的试验装置, 通过电化学测试、表面形貌分析及失重试验, 研究了漏磁场对鹰潭土壤模拟液中管线钢交流腐蚀行为的影响, 为实施漏磁内检测的油气管道交流腐蚀防护提供基础支撑。

1 试验方法

试验用材料取自 X52 管线钢管, 加工成 10 mm \times 10 mm \times 6 mm 的试样。为模拟实际情况, 从 $\phi 219$ mm \times 6 mm 的钢管上加工宽度 10 mm 的圆环, 缠绕 650 圈直径 0.82 mm 绝缘铜芯线, 将圆环切一个缺口用于嵌

入试验试样。试验用电解池为尼龙塑料加工, 下表面加工 $\phi 7$ mm 圆形通孔与试样连接, 以硅胶垫圈密封, 工作面水平向上浸泡于溶液中。试验装置示意图见图 1, 图中 AC 为交流电源, WE 为工作电极, RE 为参比电极 (饱和甘汞电极, SCE), CE 为辅助铂电极。试验装置包括 3 个电回路: (1) 交流干扰回路包括交流数字信号发生器、470 μF 的电容、10 Ω 的电阻及铂电极, 数字信号发生器用于产生交流电流, 电容用来阻止交流电流对测试回路的影响以及过虑交流回路中的直流电流, 通过测量电阻两端电压来计算回路电流; (2) 测试回路主要有电化学工作站 (Gamry 600+)、10 H 的电感和铂辅助电极, 其中的电化学工作站用来电化学测试, 电感用来阻止回路中的交流电; (3) 磁场发生回路包括直流电源和 650 圈绝缘铜线, 用于产生环形磁场磁化试验试样。试验前, 以水砂纸逐级打磨试样工作面到 600 目, 用丙酮和无水乙醇清洗试样。鹰潭酸性土壤模拟液的成分配比^[30]为 0.222 g/L CaCl_2 、0.936 g/L NaCl 、0.284 g/L Na_2SO_4 、0.394 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.586 g/L KNO_3 、0.302 g/L NaHCO_3 , 用乙酸和氢氧化钠调节溶液 pH 值到约 4.1, 用分析纯级试剂和去离子水配制溶液。

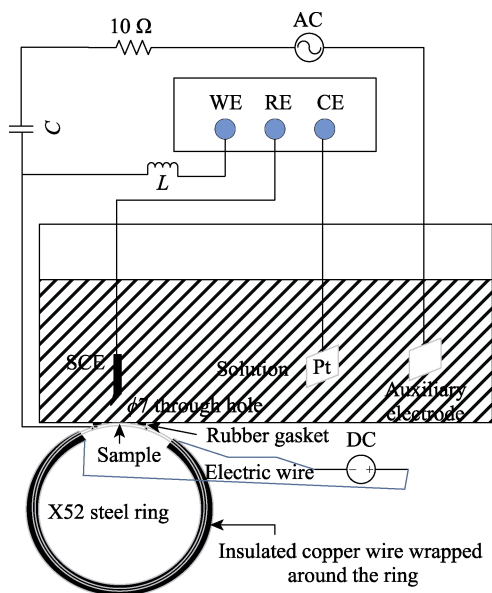


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

将试样在 -1.0 V 电位下阴极极化 3 min 后测试开路电位 (OCP), 在自然电位下测试 200 s 左右施加有效电流密度为 200 A/m^2 的 50 Hz 交流电, 在 2 500 s 左右加直流电流以产生外部磁场对试验试样磁化, 对比试样不加磁场。以高频数据采集卡 (Dlink USB-1902) 用 5 kHz 频率测试交流干扰下刚施加磁场及施加磁场 46 h 的试样的实时腐蚀电位。以 1 mV/s 的扫描速率测量动电位极化曲线。在交流电流断开且腐蚀电位稳定后测电化学阻抗谱 (EIS), 其正弦波激励信

号的振幅为 $\pm 10 \text{ mV}$, 扫描频率范围取 $0.01 \text{ Hz} \sim 100 \text{ kHz}$ 。极化曲线动力学参数用软件 Origin2017 拟合, 电化学阻抗谱曲线以软件 ZsimpWin3.60 拟合。日立 S-3500 扫描电镜被用于腐蚀产物、腐蚀表面形貌观察 (SEM) 以及腐蚀产物能谱分析 (EDS)。失重试验前后用精度为 0.1 mg 的高精度电子天平称量试样, 计算有无磁场条件下试样的平均腐蚀速率。试验在室温下进行。

试验中在圆环缠绕线圈中通 2 A 直流电流模拟试样磁化, 由公式 (1) 计算得到磁场强度为 1.9 kA/m 。

$$H = \frac{NI}{L} \quad (1)$$

式中: H 表示磁场强度 (A/m); N 表示铜线圈匝数; I 表示直流电流值 (A); L 表示回环磁路长度 (m)。相关研究^[34]显示, 磁场强度为 4.5 kA/m 时, X52 钢中的磁感应强度小于 1.5 T , 即试样处于非饱和磁化状态。

2 结果与讨论

2.1 腐蚀电位

图 2 为交流腐蚀的直流电位变化情况。施加交流干扰后, 腐蚀电位立即显著负移, 且很快保持基本稳定, 与交流杂散电流腐蚀相关研究^[15,30,35]结果一致。鹰潭模拟溶液中自然腐蚀的管线钢施加磁场时, 腐蚀电位会直接正向偏移, 且磁场强度越大, 正向偏移量越大^[36]。而在交流干扰下施加外部磁场后, 原本稳定的腐蚀电位在一定时间 (多次测试显示在 $400 \sim 3\,000 \text{ s}$ 之间) 后开始先负向偏移, 之后再缓慢正向偏移, 并最终正于未磁化试样的腐蚀电位。

图 3 为以 $5\,000 \text{ Hz}$ 频率采集的交流电极电位。研究表明, 交流干扰下的试样电极电位随干扰源周期变化^[37]。由图 3 可见, 外加磁场不改变试样交流电极

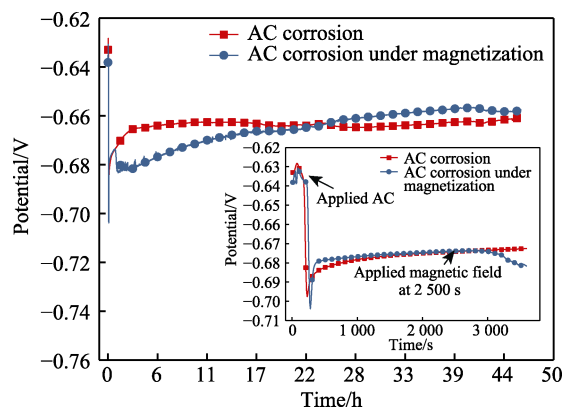


图 2 鹰潭土壤模拟液中 X52 钢交流干扰下有无磁场时的直流腐蚀电位

Fig.2 DC corrosion potentials of magnetized and nonmagnetized X52 steel samples in simulated Yingtan soil solution

电位的变化规律,刚施加磁场时的电位幅值基本不发生变化,但磁化约46 h后的试样交流电极电位幅值明显大于未磁化试样。计算高频测量的电极电位一个周期内的均值,刚磁化时试样的平均电位为 -0.663 V,与未磁化试样的平均电位值 -0.664 V基本无区别;磁化46 h的试样平均电位为 -0.630 V,明显高于未磁化试样的平均电位 -0.641 V,与测得的直流电位相对大小一致。

2.2 动电位极化

图4为动电位极化曲线。阴极极化刚开始时,磁

化和未磁化试样的极化曲线几乎重合,随着极化电位靠近腐蚀电位,2种电流值差别逐渐变大;阳极极化区,磁化0.5 h时磁化和未磁化试样的阳极曲线基本重合,在腐蚀电位附近,磁化3、18 h的试样的阳极极化电流明显大于未磁化试样的极化电流,随着电位升高,差异逐渐减小。

2.3 EIS

图5为Nyquist和Bode曲线。2种情况下电化学阻抗谱都为单一容抗弧,说明反应过程由电子转移过程控制。研究^[13]表明,腐蚀界面的容抗和阻抗对交

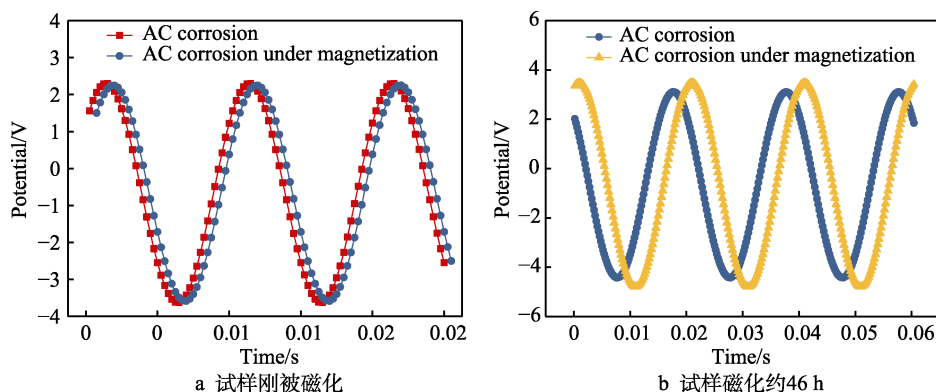


图3 鹰潭土壤模拟液中X52钢交流干扰下有无磁场时的电极电位

Fig.3 Polarization potentials of X52 steel samples in simulated Yingtan soil solution: a) the sample was just magnetized; b) the sample was magnetized for about 46 h

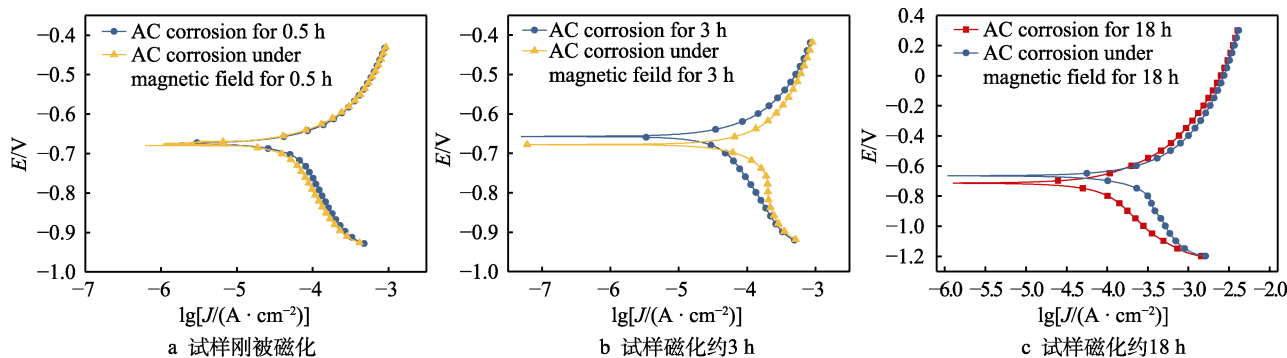


图4 鹰潭土壤模拟液中X52钢交流干扰下有无磁场时的动电位极化曲线

Fig.4 Potentiodynamic polarization curves of nonmagnetized and magnetized X52 steel samples in simulated Yingtan soil solution: a) the sample was just magnetized; b) the sample was magnetized for about 3 h; c) the sample was magnetized for about 18 h

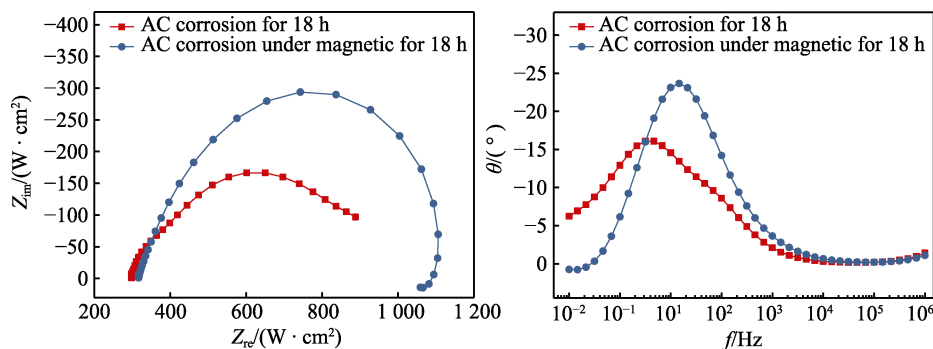


图5 交流干扰下鹰潭土壤模拟液中磁化和未磁化X52钢腐蚀18 h的Nyquist和Bode图
Fig.5 Nyquist and Bode plots of EIS of nonmagnetized and magnetized X52 steel samples in simulated Yingtan soil solution for 18 h

流腐蚀速率具有重要影响。为研究交流腐蚀速率, 以等效电路 $R(CR)$ 对 EIS 数据进行拟合, 拟合结果见表 1, R_s 为溶液电阻, C_{dl} 为双电层电容, R_f 为法拉第电阻。磁场影响下交流腐蚀 18 h 试样的法拉第增大、双电层电容减小, 说明漏磁场对试样反应界面状态产生了影响。

2.4 腐蚀速率

由图 6 可见, 交流腐蚀速率远大于自然腐蚀速率 (0.34 mm/a), 且受 1.9 kA/m 磁场强度磁化的试样的交流腐蚀速率 (1.32 mm/a) 明显大于未磁化试样的交流腐蚀速率 (0.80 mm/a), 速率增加高达 65%。

2.5 腐蚀产物及形貌

图 7 为腐蚀产物的 SEM 和 EDS 结果。磁化试样腐蚀产物为柱状颗粒聚积, 腐蚀产物的形成过程似有方向选择性, 产物间存在一定空隙, 未磁化试样腐蚀产物由更细小的颗粒成块状堆积。EDS 结果表明, 2 种腐蚀产物都主要由 O 和 Fe 组成, 且成分比例基本相当, 磁化试样腐蚀产物的 O 和 Fe 原子比为 69.73 : 30.27, 未磁化的比值为 68.31 : 31.69。图 8 中磁化和未磁化试样交流腐蚀形貌都是均匀腐蚀, 无明显差异。

表 1 EIS 测试数据的 $R(CR)$ 等效电路拟合结果
Tab.1 $R(CR)$ equivalent circuit fitting results of EIS test data

Test conditions	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$C_{dl}/(\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
AC corrosion for 18 h	316	7.649×10^{-4}	465
AC corrosion and magnetization for 18 h	332	2.101×10^{-4}	718

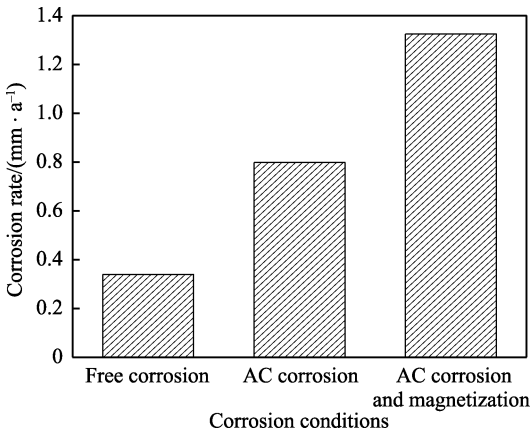


图 6 鹰潭土壤模拟液中腐蚀 165 h 的 X52 钢自然腐蚀速率、未磁化和磁化时的交流腐蚀速率

Fig.6 Natural corrosion rate and AC corrosion rates of nonmagnetized and magnetized X52 steel samples in simulated Yingtan soil solution for 165 h

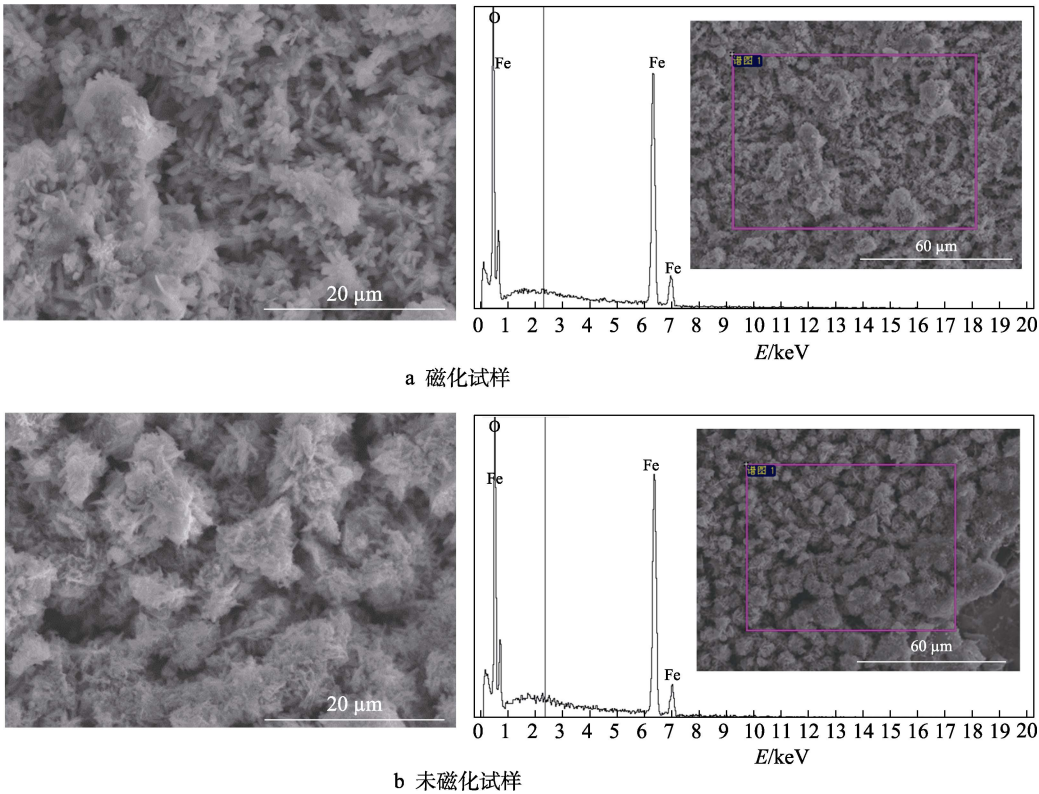


图 7 鹰潭土壤模拟液中 X52 钢交流腐蚀产物的微观形貌和成分分析
Fig.7 SEM and EDS of AC corrosion products of X52 steel samples immersed in simulated Yingtan soil solution: a) magnetized sample; b) nonmagnetized sample

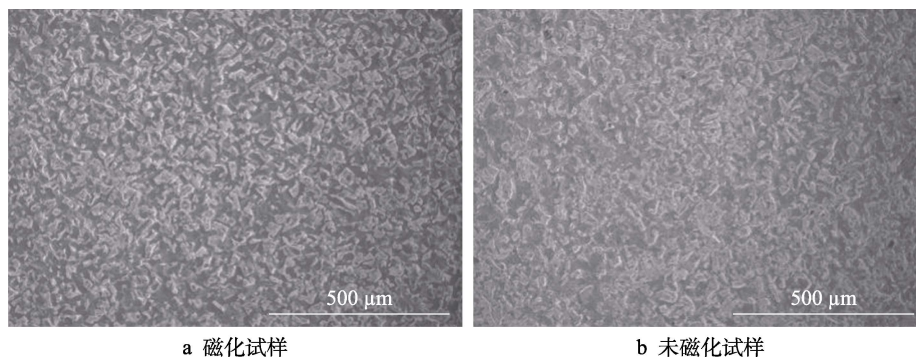


图8 鹰潭土壤模拟液中 X52 钢试样 AC 腐蚀 165 h 的形貌

Fig.8 AC corrosion morphologies of X52 steel samples immersed in simulated Yingtan soil solution for 165 h: a) magnetized sample; b) nonmagnetized sample

3 分析与讨论

无阴极保护的金属管道交流杂散电流腐蚀机理主要为阳极反应去极化机制及法拉第整流^[38], 研究^[13]发现, 交流腐蚀的直接驱动力为双电层电位, 反应界面电容及法拉第电阻的比值对腐蚀速率具有决定性影响, 交流电流通过对界面电容的充放电使双电层电位发生周期性振荡, 造成阳极腐蚀电流发生周期性变化, 正半周的腐蚀电流增加量大于负半周的减小量, 使总的腐蚀速率增大。交流腐蚀的电极系统等效电路如图9所示, 在 A 、 B 间加交流电 I 时, 界面电容 C_{dl} 会交替充放电, 电流 I_{cdl} 发生正负周期性变化且对腐蚀无贡献, 流过法拉第电阻 R_f 的法拉第电流 I_f 在正负循环的正半周使金属腐蚀溶解。 I 一定时, C_{dl} 和 R_f 的相对大小决定了 I_f 的大小, 即电容值越大、法拉第电阻越小, 腐蚀速率越大。在双电层电位 E 变化不大时, 认为电位极化为线性极化, 可推出公式(2)^[13], 式中 R_t 为 C_{dl} 和 R_f 的并联阻抗, ω 为交流电流角频率。

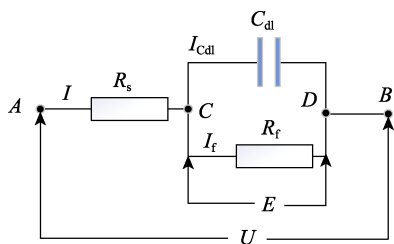


图9 交流腐蚀电极系统的等效电路

Fig.9 Equivalent circuit of electrode system suffered AC corrosion

$$R_t = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 C_{dl}^2 + \frac{1}{R_f^2}}} \quad (2)$$

交流腐蚀过程中, 溶液电阻 R_s 一般稳定, 则 I 和 R_f 一定时, C_{dl} 越小, R_t 及 I_f 越大, 即 AB 间交流电位 U 和交流腐蚀速率越大。图3b显示的交流腐蚀46 h后磁化试样交流幅值电位更大, 说明漏磁场增大

了交流腐蚀速率。以表1中的参数计算在EIS测试的外加 200 A/m^2 交流电流的法拉第电流产生的腐蚀速率分别为 2.0 、 4.7 mm/a , 即磁化试样的交流腐蚀速率大于未磁化试样的, 腐蚀速率计算值比图6中的实测值大2倍左右, 原因是参数测量误差、计算过程线性极化简化以及图6中为平均腐蚀速率等因素影响所致。

本研究中作用于交流腐蚀反应的磁场为磁化试样在缺陷处泄漏到介质中的磁场, 电化学反应处的磁感应强度取决于试样磁化强度、表面几何状态(表面粗糙度类似于小缺陷)及介质磁感应系数等。试样表面缺陷产生的漏磁场如图10所示。研究认为磁场对电极反应过程的电子转移几乎没有影响^[39], 但会对传质过程产生明显影响^[33,39-40]。磁场通过洛伦磁力^[41]、磁场梯度力(开尔文力)^[42]和顺磁性梯度力^[33]等对溶液传质过程产生影响。其中顺磁性梯度力与离子扩散驱动力的方向相反, 并且数值要小2个数量级^[33], 故在本研究中可忽略。

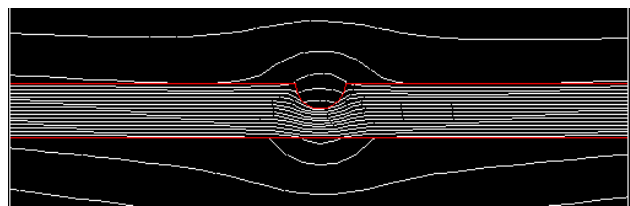


图10 试样表面的磁感应强度分布示意图

Fig.10 Schematic diagram of magnetic flux intensity distribution on sample surface

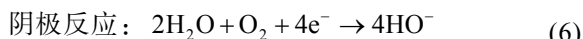
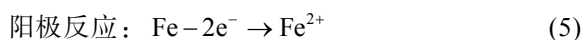
磁场中带电运动离子产生的洛伦磁力 F_L 表达式如公式(3)所示, 式中 J 表示带离子能量密度, B 表示磁感应强度。

$$F_L = J \times B \quad (3)$$

如公式(4)所示, 磁场梯度力 F_B 作用下, 非均匀磁场中的顺磁性离子会往高磁感应强度区运动, 逆磁性离子会往低磁感应强度区运动。

$$F_B = \frac{\chi_m c B \nabla B}{\mu_0} \quad (4)$$

式中: χ_m 表示单位质量磁化率; c 表示磁性离子浓度; μ_0 表示绝对磁导率; ∇B 表示磁感应强度梯度。本研究中腐蚀界面的主要反应有^[43]:



反应过程中, 静电力作用下带电离子在反应界面和溶液之间迁移, 切割磁力线产生平行于电极表面的 F_L , 使反应界面附近的溶液产生运动, 从而加速反应物质扩散及减小扩散层厚度^[44], 促进腐蚀反应的进行。 F_B 大小由离子磁性、离子浓度、磁感应强度及磁场梯度共同决定, 离子磁性及磁感应强度分布决定了离子移动方向。如图 10 所示, 电极表面几何不连续处的磁感应强度更大, 铁磁性离子 Fe^{2+} 倾向于往电极表面几何不连续处汇集, 会抑制阳极反应而减缓金属腐蚀, 顺磁性粒子 O_2 、 H^+ 在磁场梯度作用下受到向电极表面的力, 促进阴极反应进行。腐蚀刚开始时, 试样表面相对平滑及反应产物较少, 磁感应强度和磁场力都较小, 洛伦磁力开始推动溶液运动, 但此时反应界面阴极反应物相对充裕, 磁场对阴极反应的加速作用小于阳极反应, 致使腐蚀电位负移 (图 2)。随着腐蚀发展, 磁感应强度和磁场力增大, 洛伦磁力对溶液运动和腐蚀促进作用加强, 增大的磁场梯度力一方面一定程度上抑制了阳极反应, 另一方面促进了阴极反应, 表现为磁场作用下腐蚀电位正移 (图 2)。本研究中, 磁场通过洛伦磁力和磁场梯度力综合作用, 促进了电化学反应和交流腐蚀, 表现为动电位极化电流 (图 4) 及平均腐蚀速率 (图 6) 增大。

从腐蚀产物形貌看, 磁场一定程度上影响腐蚀产物生长方向, 腐蚀产物中的铁磁性成分沿着磁力线方向排列生成形成图 8a 所示的柱状颗粒。缺陷处的较大磁场梯度力和反应界面处溶液的运动并不利于局部腐蚀的形成, 磁场不改变试验条件下的均匀腐蚀形貌。

4 结论

1) 交流腐蚀刚开始时, 磁场使腐蚀电位负移, 但交流幅值电位及动电位极化电流无明显变化; 腐蚀数小时后, 磁场使交流腐蚀电位正向偏移, 交流电位幅值及动电极极化电流明显变大。

2) 磁场使交流腐蚀反应界面的电容减小、法拉第电阻增大, 明显增大交流腐蚀速率。

3) 磁场中的洛伦磁力加速了交流腐蚀反应粒子的扩散及减小腐蚀界面扩散层厚度, 促进了电化学反应, 磁场梯度力对磁场粒子的作用一定程度上抑制了

阳极反应、促进了阴极反应, 本研究条件下的磁场总体上加速了交流腐蚀。

参考文献:

- [1] 符耀庆, 王秀通, 陈胜利. 南朗段埋地天然气管道杂散电流检测与治理[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 22-27.
FU Yao-qing, WANG Xiu-tong, CHEN Sheng-li. Stray Current Detection and Treatment for Buried Natural Gas Pipeline of Nanlang Segment[J]. Surface Technology, 2016, 45(2): 22-27.
- [2] HANSON H R, SMART J. AC Corrosion on a Pipeline Located in a HVAC Utility Corridor[J]. Corrosion, 2004, 2004: 563.
- [3] MOVLEY C M. Pipeline Corrosion from Induced A. C. Two UK Case Histories[J]. Corrosion, 2005, 2005: 633.
- [4] FLOYD R. Testing and Mitigation of AC Corrosion on 8 Line: A Field Study[J]. Corrosion, 2004, 2004: 256.
- [5] WAKELIN R, SHELDON C. Investigation and Mitigation of AC Corrosion on a 300 mm Natural Gas Pipeline[J]. Corrosion, 2004, 2004: 556.
- [6] FU A Q, CHENG Y F. Effects of Alternating Current on Corrosion of a Coated Pipeline Steel in a Chloride-Containing Carbonate/Bicarbonate Solution[J]. Corrosion Science, 2010, 52(2): 612-619.
- [7] GUO Yan-bao, MENG Tao, WANG De-guo, et al. Experimental Research on the Corrosion of X Series Pipeline Steels under Alternating Current Interference[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 78: 87-98.
- [8] 翁永基, 王宁. 碳钢交流电腐蚀机理的探讨[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2011, 31(4): 270-274.
WENG Yong-ji, WANG Ning. Carbon Steel Corrosion Induced by Alternating Current[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2011, 31(4): 270-274.
- [9] ZHU M, DU C W, LI X G, et al. Effect of AC on Corrosion Behavior of X80 Pipeline Steel in High pH Solution[J]. Materials and Corrosion, 2015, 66(5): 486-493.
- [10] 杨燕, 李自力, 文闯. 交流电对 X70 钢表面形态及电化学行为的影响[J]. 金属学报, 2013, 49(1): 43-50.
YANG Yan, LI Zi-li, WEN Chuang. Effects of Alternating Current on X70 Steel Morphology and Electrochemical Behavior[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(1): 43-50.
- [11] WEI Bo-xin, XU Jin, QIN Qing-yu, et al. Comparison of AC Corrosion of X80 Steel in Real Soil, Soil Extract Solution, and Simulated Solution[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(8): 4967-4977.
- [12] 马鋈. 基于电流信息的三端环形直流配电网保护策略[J]. 重庆工商大学学报 (自然科学版), 2021, 38(1): 21-28.
MA Yun. Protection Strategy for Three-terminal Annular DC Distribution Network Based on Current Information[J]. Journal of Chongqing Technology and Business

- University (Natural Science Edition), 2021, 38(1): 21-28.
- [13] 杨永. X100 管线钢交流杂散电流腐蚀行为及机理研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
YANG Yong. Study on AC Stray Current Corrosion Behavior and Mechanism of X100 Pipeline Steel[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.
- [14] QIN Qing-yu, WEI Bo-xin, BAI Yun-long, et al. Effect of Alternating Current Frequency on Corrosion Behavior of X80 Pipeline Steel in Coastal Saline Soil[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 120: 105065.
- [15] YANG Yong. Effects of Alternating Current on Corrosion Behavior of X100 Pipeline Steel in Simulated Soil Solution[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2021, 452: 150927.
- [16] 吕战鹏, 陈俊明. 磁场和 Cl^- 对铁在中性 Na_2SO_4 溶液中阳极极化行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1997, 17(1): 25-30.
LYU Zhan-peng, CHEN Jun-ming. Effect of Magnetic Field and Cl^- on Anodic Polarization Behavior of Iron in Neutral 0.5 mol/L Na_2SO_4 Solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1997, 17(1): 25-30.
- [17] 吕战鹏, 黄德伦, 杨武. 磁场作用下铁在盐酸和氯化钠溶液中自腐蚀状态的变化[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(5): 185-189.
LYU Zhan-peng, HUANG De-lun, YANG Wu. Magnetic Field Induced Variation of Open Circuit State of Iron in Chloride Solutions[J]. Corrosion & Protection, 2002, 23(5): 185-189.
- [18] 蔡爽巍, 宁飞, 唐元杰, 等. 磁场对铁在不同电位高氯酸钠溶液中阳极溶解的影响[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(8): 1-5, 51.
CAI Shuang-wei, NING Fei, TANG Yuan-jie, et al. Effect of Magnetic Field on Anodic Dissolution of Iron in Sodium Perchlorate Solution at Different Potentials[J]. Corrosion and Protection, 2020, 41(8): 1-5, 51.
- [19] 卫晓阳, MORADI Masoumeh, 杨丽景, 等. 磁场对纯 Cu 微生物腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(6): 484-494.
WEI Xiao-yang, MORADI M, YANG Li-jing, et al. Influence of Magnetic Field on Corrosion of Pure Cu in Artificial Seawater with Multispecies Aerobic Bacteria[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(6): 484-494.
- [20] LU Zhan-peng, SHOJI T, YANG Wu. Anomalous Surface Morphology of Iron Generated after Anodic Dissolution under Magnetic Fields[J]. Corrosion Science, 2010, 52(8): 2680-2686.
- [21] LU Zhan-peng, HUANG De-lun, YANG Wu, et al. Effects of an Applied Magnetic Field on the Dissolution and Passivation of Iron in Sulphuric Acid[J]. Corrosion Science, 2003, 45(10): 2233-2249.
- [22] SUEPITZ R, TSCHULIK K, UHLEMANN M, et al. Retarding the Corrosion of Iron by Inhomogeneous Magnetic Fields[J]. Materials and Corrosion, 2014, 65(8): 803-808.
- [23] 张康南, 吴明, 谢飞, 等. 磁场对 X80 管线钢在沈阳草甸土中腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(2): 148-154.
ZHANG Kang-nan, WU Ming, XIE Fei, et al. Effect of Magnetic Field on Corrosion of X80 Pipeline Steel in Meadow Soil at Shenyang Area[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(2): 148-154.
- [24] 惠海军, 戴乾生, 陈凯, 等. 磁场对 X60 钢材料在长沙地区土壤中腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(7): 474-478, 512.
XI Hai-jun, DAI Qian-sheng, CHEN Kai, et al. Effect of Magnetic Field on Corrosion of X60 Pipeline Steel in Soil of Changsha Area[J]. Corrosion & Protection, 2019, 40(7): 474-478, 512.
- [25] JACKSON J E, LASSEIGNE-JACKSON A N, SANCHEZ F J, et al. The Influence of Magnetization on Corrosion in Pipeline Steels[C]//Proceedings of 2006 International Pipeline Conference. Calgary: [n. s.], 2008: 921-929.
- [26] ESPINA-HERNÁNDEZ J H, CALEYO F, VENEGAS V, et al. Pitting Corrosion in Low Carbon Steel Influenced by Remanent Magnetization[J]. Corrosion Science, 2011, 53(10): 3100-3107.
- [27] ZHANG Peng, CHEN Gang, GUO Bin, et al. Corrosion Inhibition Mechanism of Magnetic Field on Carbon Steel[J]. Advanced Materials Research, 2010, 152-153: 353-356.
- [28] 杨理践, 耿浩, 高松巍. 长输油气管道漏磁内检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1736-1746.
YANG Li-jian, GENG Hao, GAO Song-wei. Magnetic Flux Leakage Internal Detection Technology of the Long Distance Oil Pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1736-1746.
- [29] 刘智勇, 翟国丽, 杜翠薇, 等. X70 钢在酸性土壤模拟溶液中的应力腐蚀行为[J]. 金属学报, 2008, 44(2): 209-214.
LIU Zhi-yong, ZHAI Guo-li, DU Cui-wei, et al. Stress Corrosion Behavior of X70 Pipeline Steel in Simulated Solution of Acid Soil[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(2): 209-214.
- [30] 朱敏, 刘智勇, 杜翠薇, 等. 交流电对 X80 钢在酸性土壤环境中腐蚀行为的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(2): 85-90.
ZHU Min, LIU Zhi-yong, DU Cui-wei, et al. Effects of Alternating Current on Corrosion Behavior of X80 Pipeline Steel in Acid Soil Environment[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(2): 85-90.
- [31] LU Zhan-peng, HUANG Chun-bo, HUANG De-lun, et al. Effects of a Magnetic Field on the Anodic Dissolution, Passivation and Transpassivation Behaviour of Iron in Weakly Alkaline Solutions with or without Halides[J]. Corrosion Science, 2006, 48(10): 3049-3077.