

专题——金属材料土壤腐蚀及控制技术

埋地阴极保护管线的交流干扰腐蚀

闫茂成¹, 石薇², 王彬彬³

(1.中国科学院金属研究所 国家金属腐蚀控制工程技术研究中心, 沈阳 110016; 2.广东腐蚀科学与技术创新研究院, 广州 510535; 3.国家管网集团西南管道有限责任公司, 成都 610000)

摘要: 通过阴极保护管道交流腐蚀案例, 总结了交流输电线路等交流设施对埋地管道的干扰规律、阴极保护管道交流腐蚀的特征、发生条件及影响因素等。综述了交流电对管道钢材料活化和钝化体系的电极过程和极化行为的主要影响规律; 高阴极保护水平对交流腐蚀的协同加速作用。系统阐述了阴极保护条件下管道发生交流腐蚀的机理及评估准则等方面的最新研究进展; 梳理了交流干扰腐蚀机理模型中的主要观点和影响因素, 同时阐述了交流干扰下阴极保护技术面临的主要问题。

关键词: 埋地管道; 阴极保护; 杂散电流干扰; 交流腐蚀

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)04-0001-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.04.001

Research on AC Interference Corrosion of Buried Pipeline with Cathodic Protection

YAN Mao-cheng¹, SHI Wei², WANG Bin-bin³

(1. Institute of Metals Research, Chinese Academy of Sciences, National Research Center of Metal Corrosion Control, Shenyang 110016, Liaoning, China; 2. Guangdong Institute of Corrosion Science and Technology Innovation, Guangzhou 510535, Guangdong, China; 3. Pipe China Southwest Pipeline Company, Chengdu 610000, Sichuan, China)

ABSTRACT: Through the case study of AC corrosion on pipeline with cathodic protection, the interference trend of AC facilities such as AC transmission line on buried pipeline, the characteristics, occurrence conditions and influencing factors of AC corrosion of pipeline with cathodic protection are summarized. The main influence of alternating current on the electrode process and polarization behavior of pipeline steel material activation and passivation system, and the synergistic acceleration of high cathodic protection level on AC corrosion are summarized. This paper systematically describes the latest research progress in the mechanism and evaluation criteria of AC corrosion of pipelines under cathodic protection. The main viewpoints and influencing factors in the mechanism model of AC interference corrosion are discussed, and the problems in cathodic protection technology of pipeline under the condition of AC interference are expounded.

KEY WORDS: buried pipeline; cathodic protection; stray current interference; AC corrosion

我国幅员辽阔, 电力等能源的应用上有着明显的“荷源分离”现象, 约 80% 的能源分布在西北部, 而

70% 的电力负荷集中于中部和东部。在此背景下, 近几年, 我国电力输送、铁路系统及油气输送管线建设

收稿日期: 2021-03-07; 修订日期: 2021-04-09

Received: 2021-03-07; Revised: 2021-04-09

作者简介: 闫茂成 (1976—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为油气管道土壤腐蚀及涂层/阴极保护联合防护技术。

Biography: YAN Mao-cheng (1976—), Male, Ph.D., Associate researcher, Research focus: soil corrosion of oil and gas pipelines and coating/cathodic protection joint protection.

引文格式: 闫茂成, 石薇, 王彬彬. 埋地阴极保护管线的交流干扰腐蚀[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 001-008.

YAN Mao-cheng, SHI Wei, WANG Bin-bin. Research on AC interference corrosion of buried pipeline with cathodic protection[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(4): 001-008.

实现了跨越式发展。近 10 年来,我国已投运及已建成的 500 kV 及以上交流超高压、特高压输电工程已多达数十项。我国油气管线建设快速推进,2020 年,油气管网规模达到 1.69×10^5 km,到 2025 年,管网规模将达 2.4×10^5 km。管线和高压输电线路常使用相同的路由通道,大量油气管线与电气化铁路和大功率高压输电线路交叉或平行,交流干扰引发的埋地管道腐蚀问题也受到越来越多的关注。

交流输电线路在稳态运行时,对临近埋地金属管道会产生感应电压,引起持续的交流干扰腐蚀。故障状态下,瞬时强电流也会影响管道防腐层和阴极保护设备,甚至会增加管道被击穿的风险。杂散电流进入管线后,通过绝缘性良好的管线传导,并从涂层缺陷处流出,造成此处腐蚀剧烈。故障状态下,瞬时强电流也会影响管道防腐层和阴极保护设备,甚至会造成泄漏、爆炸等,威胁管道运行安全。

埋地管道交流杂散电流主要来源于高压交流输电系统和交流电气化铁路,其主要通过电阻耦合、电感耦合和电容耦合等不同形式对管道造成交流干扰。当输电线路短路或故障时,阻性耦合便会发生;容性耦合在管道建设期间主要对人体安全产生危害;感应耦合由架空线路传输的交流电流产生的交变磁场引起,对临近金属结构物的腐蚀存在显著影响。交流电源系统发生短路情况下,电源导线中部分电流会通过塔架或变电站的地基和接地系统流入大地,引起管道附近的地电位升高,相对于远地电位通常上升数千伏,在金属管道防腐层上产生很大的交流电压。交流输电线路中的交流电会在导体周围产生交变磁场,在防腐层管道中感应出交流电。对于三相交流系统,三相电流大小相等,并且 3 个架空导线与管道轴线的距离相等,管道上不会感应出任何电压。但是,更常见的情况是三相导体和管道间不对称,进而产生感应交流电压^[1]。

最初,金属管道中的感应交流电压主要被视为管道操作人员的安全隐患,因为根据管道的接地条件,电压很容易达到 50~100 V。根据美国国家标准局早期研究结果,交流电引起的腐蚀远小于等量直流电流引起的腐蚀,前者仅占后者的 1%。Williams 也认为,与等量的直流电流引起的腐蚀相比,交流电流诱发的腐蚀微不足道^[2]。这些结果致使人们忽略了交流干扰对管道的危害,更多地关注直流腐蚀问题。由交流电引发的埋地管线腐蚀,很少被管线运营商关注,直到 1986 年德国的一条阴极保护良好的管道上发生了严重的交流腐蚀^[3]。随后几年,由于交流干扰的作用引发管道腐蚀失效的情况越来越多,且很多交流腐蚀案例出现在满足阴极保护标准的管道上^[4-7]。1991 年,加拿大安大略基奇纳市的一条服役 4 年的天然气管道发生泄漏,现场调研发现,该管线与一条高压输

电线路并行 4.4 km,管道上的交流电压高达 28 V^[8]。1994 年,多伦多一条直径 250 mm 的输油管道与一条高压输电线长距离并行,内检测发现,管道发生了严重点蚀,最大坑深达管壁厚度的 88%,测试发现,此处管道的交流感应电压为 15 V^[9]。2002 年,一段直径为 300 mm、壁厚为 6.35 mm 的天然气管线在美国奥斯威戈发生泄漏,该管道与一条 115 kV 和一条 345 kV 的高压输电线并行^[10]。2004 年,美国得克萨斯州一条直径为 203.2 mm 的液态丁烷管道发生泄漏,经调查发现,该事故与管道交流腐蚀有关^[6]。

早在 19 世纪初,人们就知道交流会加速金属加速腐蚀的风险^[2,9],但关于交流对管道腐蚀影响的早期研究得出,可以通过提高阴极保护系统的阴极电流输出来解决这一威胁^[11]。阴极保护电位是影响交流腐蚀的一个关键参数^[12-14],阴极保护可能有效缓解部分交流腐蚀,但过保护(电位低于 -1.2 V (vs. CSE))会导致交流腐蚀速率增大,加大交流腐蚀风险。一些交流干扰情况下,即使满足 -0.850 V 的阴极保护标准,管线也可能发生交流腐蚀。

交流电导致的金属腐蚀行为是一个较复杂的问题。尽管目前人们对油气管道交流腐蚀已有较深入的认识,许多交流腐蚀发生的条件和因素已经被很好地理解,交流腐蚀仍然对管道的完整性构成严重威胁,从而对人员和环境安全构成威胁。交流腐蚀过程复杂,不仅受交流干扰电压、交流电流密度及阴极保护水平影响,还与土壤环境(pH、Ca²⁺、Mg²⁺等)和防腐层缺陷大小等因素有关。国内外研究人员围绕埋地管道交流干扰形式、交流干扰的测试及评估、交流腐蚀特征及机理等方面开展了众多研究。由于腐蚀过程复杂,影响因素众多,各机理都存在局限性,未能达成一致,也没有统一的评价指标和方法。文中系统阐述了交流设施对管道的干扰规律,交流干扰下管道的腐蚀行为,同时列举了交流干扰下阴极保护面临的问题及交流腐蚀机理的研究进展等。

1 阴极保护管线交流腐蚀识别

交流腐蚀案例中,腐蚀处表面形貌具有明显特征,多为小而深的腐蚀坑,且腐蚀处周围土壤发生明显变化。阴极保护管道交流干扰引起的腐蚀的典型特征:腐蚀是局部的,通常发生在直径几厘米的小防腐层处;腐蚀产物从防腐层缺陷中突出;周围的土壤可能会形成半球形的硬壳,直径可达几十厘米;管道腐蚀坑表面常呈碗状,表面光滑或有凹痕;可测到较高的交流电压。

图 1 为开挖后管道表面出现交流腐蚀的一个典型案例,可观察到管道表面形成了大块石质土壳。此外,在剥离防腐层后,可以观察到下方管道表面的外观发生了变化,并出现了特征性的“点状”外观。



图 1 管道交流腐蚀处形成大块石质土壳

Fig.1 Large rocky soil crust formed by AC corrosion on pipeline

Ragault^[15]和 Williams^[2]对 AC 干扰腐蚀产物进行的研究表明,AC 干扰下管道的主要腐蚀产物是磁铁矿,有时与土壤结合。

Linhardt 和 Ball (2006) 对阴极保护管道^[16]上的交流腐蚀事件进行了失效分析。如图 2 所示,在腐蚀

破损顶部观察到石质土壳的形成。图 2d 显示了石质硬土层由 A、B 和 C 三种不同的相组成, A 为含氧化铁 (主要是 Fe_3O_4) 的黑色化合物; B 为含 Na、K、Ca 和 Mg 的灰色土壤, 靠近破损点处, Na 的浓度显著增加; C 为 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 的混合物, pH 为 9.6。

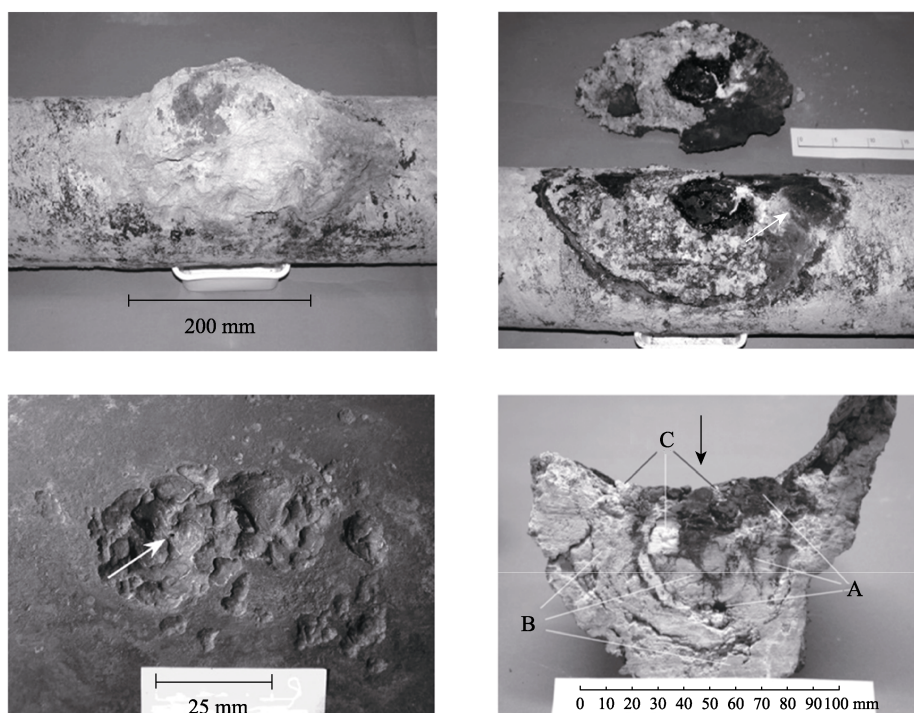
图 2 防腐层破损处管道表面交流腐蚀形成的石质土壳^[16]

Fig.2 Rocky soil crust formed by AC corrosion on the steel pipeline at coating defect

Nielsen 和 Cohn^[17]描述了 AC 干扰下防腐层缺陷表面生长的坚硬土壤腐蚀结节, 包含腐蚀产物和土壤的混合物。需要特别指出的是, 结节的电阻率明显低于周围土壤。另外, 结节的有效面积明显大于原始的防腐层缺陷。这些参数的组合导致腐蚀过程中相关防腐层缺陷的扩展阻力降低, 从而使腐蚀过程具有自催化性。

2 阴极保护管线交流腐蚀评估准则

埋地管道交流腐蚀风险评判一般采用参考交流

干扰电压、交流电流密度和交-直流电流之比等指标。BS EN 15280—2013^[18]和 ISO 18086—2015^[19]提出了避免交流腐蚀的限值 (低交流腐蚀风险) (如图 3 所示): 在一段时间范围内 (如 24 h), 埋地管道上测得的交流电压 $V_{AC} < 15 \text{ V}$; 埋地管道防腐层缺陷处 $I_{AC} < 30 \text{ A/m}^2$; $I_{AC} > 30 \text{ A/m}^2$ 时, 则需要维持阴极保护电流密度 $I_{DC} < 1 \text{ A/m}^2$; 交/直流电流之比 $I_{AC}/I_{DC} < 5$ (或采用更加严苛的条件 $I_{AC}/I_{DC} < 3$)。

有效的交流电缓解也可通过腐蚀速率测量来验证, 可接受的腐蚀速率水平根据具体情况确定, 常见的是 $< 10 \mu\text{m/a}$ ^[20]。

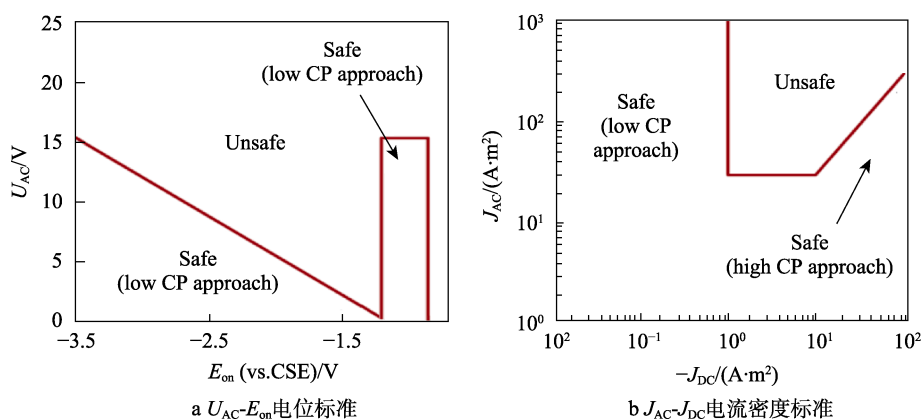


图3 ISO 18086—2015 中减轻 AC 腐蚀的保护标准
Fig.3 ISO 18086—2015 protection standards to reduce AC corrosion:
a) $U_{AC}-E_{on}$ potential standard; b) $J_{AC}-J_{DC}$ current density standard

实际上当 I_{AC} 高于某极限值时, 阴极保护无法抑制交流腐蚀^[21-24]。然而, BS EN 15280—2013^[19]和 ISO 18086—2015^[18]并未对阴极保护电流密度和交流电流密度的限值做出明确规定。故 2018 年 NACE 更新 NACE SP21424 交流干扰下埋地金属管道阴极保护评判准则^[25], 对交流电流密度和阴极保护电流密度的限值进行了补充: $I_{DC} \geq 1 \text{ A/m}^2$ 时, $I_{AC} < 30 \text{ A/m}^2$, 交流腐蚀风险低; $I_{DC} < 1 \text{ A/m}^2$ 时, $I_{AC} < 100 \text{ A/m}^2$, 交流腐蚀风险低。

3 交流电对管道钢电化学过程的影响

交流电对金属腐蚀过程作用较复杂, 可从腐蚀电化学理论加以解释。大量国内外的研究表明, 交流电不但影响管道钢材料的电位, 还可能影响甚至改变电化学活化和钝化电极体系的极化行为。交流电干扰使管线钢的电位偏移, 促进局部腐蚀的发生, 而且交流电频率越低, 腐蚀效率越高。据此, 研究人员提出了多种交流电促进金属腐蚀的模型, 如整流模型、电场诱导模型、震荡模型等。

3.1 交流电对管道电位的影响

交流电影响管道钢极化, 从而使管地电位产生偏

移。Lalvani 等^[26]研究了金属极化与交流电之间的关系, 用化学动力学理论推导出了金属开路电位与交流干扰的金属电位间的关系。结果表明, 交流干扰使腐蚀电位发生偏移, 当 $r (r = \beta_a/\beta_c) > 1$ 时, 交流电使金属电位正移; $r < 1$ 时, 交流电使金属电位负移; $r = 1$ 时, 腐蚀电位不偏移。在交流影响下, 腐蚀电流密度总是增大。交流电压峰值越大, 电位偏移量越大。

3.2 交流电对活化腐蚀体系的影响

交流干扰对钢的直流极化特性有很大的影响。Bolzoni 等^[27]在碳钢上施加不同密度的 AC 电流, 观察在自由腐蚀以及阳极和阴极极化条件下碳钢的变化。结果表明, 交流电流对阳极和阴极的极化行为以及自由腐蚀电位都有影响, 如图 4 所示。可以看出, AC 降低了阳极过程的超电势。交流电增加了还原氧的极限电流密度, 这可能是由于电极处扩散层的温度升高所致。AC 降低了氢的超电势, 导致阴极反应的电势增加。厌氧条件下, 析氢反应占主导地位, 并且可以从图 4b 中看出, 在阴极曲线给定电势下, 交流电增强了该反应。氧气还原反应和析氢反应这两种情况下, 阳极过程的过电位都随交流电的增大而减小。

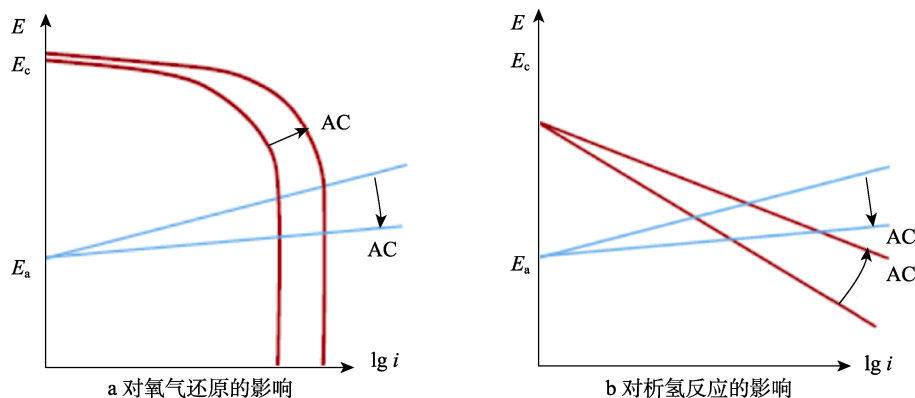


图4 交流电流对阳极极化和阴极极化影响

Fig. 4 Effect of AC current on anodic and cathodic polarisation: a) Effect on oxygen reduction; b) Effect on hydrogen evolution reaction

3.3 交流电对金属钝化行为的影响

交流电可使管道钢在阴极保护高 pH 条件下形成的钝化膜减弱,这可用交流电的力电效应来理解。交流电击穿钝化膜的机制可用膜内存在的高交变电场(约为 $10^6 \text{ V/cm}^{[28]}$)导致电致伸缩来解释。对碳钢和不锈钢在碱性溶液或混凝土等钝化体系的研究表明^[29-35],交流电影响金属的钝化行为,破坏钝化膜,进而导致钝化金属的局部腐蚀。钝化膜的损伤可能是由薄膜上存在的电场和界面张力产生的机电应力(电致伸缩张力)引起的。此外,AC 提高了腐蚀电流密度和钝化膜内点缺陷的浓度,降低了膜的稳定性和厚度,增加了膜破裂的可能性。

根据 Vetter^[36]和 Sato^[37]等提出的钝化膜力电破坏理论,钝化膜的破损是由电位突变引发。从热力学角度,膜层张力 σ 主要由大气压 σ_0 、膜层表面张力 σ_γ 、电场 E 导致电致伸缩张力 σ_E 共同决定:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_E + \sigma_\gamma = \sigma_0 + \frac{\epsilon_0(\epsilon_R - 1)E^2}{8\pi} - \frac{\gamma}{L} \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_R 为钝化膜的相对介电常数; γ 为单位长度的表面张力; L 为钝化厚度。

外电场增强,电致伸缩张力随之加大,当电场强度增强到临界值 E_{BD} 时,伸缩张力使膜层应力 σ_R 到达极限,导致膜层破损。临界电场 E_{BD} 可通过式(2)计算。

$$E_{BD} = \sqrt{\frac{\left(\sigma_R - \sigma_0 + \frac{\gamma}{L}\right) \cdot 8\pi}{\epsilon_0(\epsilon_R - 1)}} \quad (2)$$

Sato^[37]和 Strehblow^[38]等研究结果表明,膜层破损的电场临界值为 10^6 V/cm 。

4 阴极保护管道交流腐蚀机理

20 世纪 60 年代以来,交流干扰的危害和风险逐渐引起研究人员的注意。Kulman 在 1961 年发文简要阐述了交流腐蚀现象^[39-41]。1971 年,Peabody 和 Verhiel 就交流输电线路对埋地管道的影响进行了总结概括^[42]。早期文献中,无阴极保护条件下的交流腐蚀过程常用交流电的整流效应来解释^[43]。为解释阴极保护管道交流腐蚀过程和现象,研究人员先后提出了如电位震荡机理、钝化膜氧化/还原机理、钝化膜力电损伤机理、碱化机理及自催化机理等。

现有文献中,对交流电的整流效应、电位震荡等机理的引用和提及较多,此处不作详细论述^[44]。电位震荡机理从化学热力学原理角度解释了交流腐蚀现象,交流电在金属/电解质界面的循环振荡作用诱发腐蚀,这种现象归因于 E -pH 图上不同区域间(如钝化区和免蚀区之间)腐蚀状态的变化。

4.1 阴极保护管道交流腐蚀的局部环境

阴极保护管道交流腐蚀是一个多因素多控制步骤的复杂过程。交流腐蚀是在阴极保护产生的高 pH 局部环境中发生的。防腐层缺陷处在阴极保护电流作用下,阴极反应产生的 OH^- 在管道缺陷处累积,导致了局部出现高 pH 环境。钢表面最终的 pH 值取决于阴极保护水平(阴极保护电流密度)、土壤理化性质等,如图 5 所示。

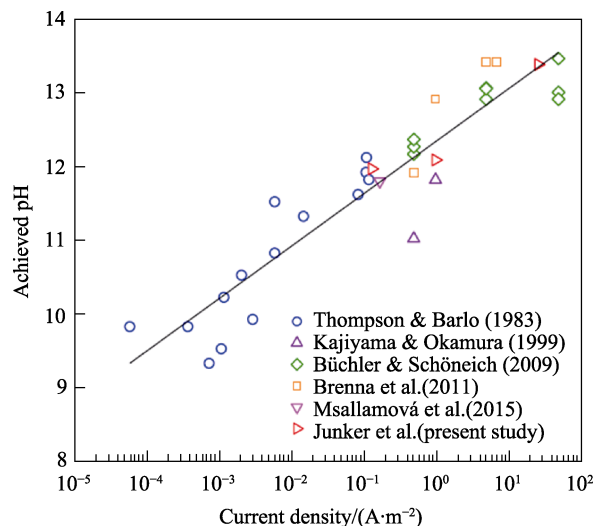


图 5 阴极保护电流密度与其导致的管道表面局部 pH 之间的关系

Fig.5 Relationship between the cathodic protection current density and the local pH on the steel pipeline

Nielsen 等^[45]基于交流干扰腐蚀研究结果,提出了交流腐蚀的碱化理论。该理论基于与交流干扰相关的 2 种效应:阴极保护电流作用下,防腐层缺陷处溶液碱化;存在交流干扰时, E -pH 图中钢的电位在钝化区、免蚀区和高 pH 腐蚀区(HFeO_2^- 稳定区)之间振荡。交流腐蚀存在“潜伏期”,即金属表面电解液达到临界 pH 的时间。潜伏期过后,由于与铁溶解(快)和钝化膜形成(慢)相关的时间常数不同,电位振荡可能导致腐蚀。高 pH 值(接近 14)下, HFeO_2^- 的形成可能会导致腐蚀,故不能通过高水平阴极保护来控制交流腐蚀。因此,存在 AC 时的保护标准比没有 AC 时更严格,因为叠加 AC 会破坏没有 AC 时具有保护作用的钝化膜。他们建议最大真实电位保持在 -1.22 V (vs. CSE) 以下^[46]。

扩展电阻是评估 AC 腐蚀风险的关键参数之一。它通过土壤电阻率和防腐层缺陷的几何形状,将管道上的交流电压和直流电位与防腐层缺陷处的电流密度相关联。阴极保护电流在防腐层缺陷处钢表面产生高 pH 值环境,该环境使防腐层缺陷处扩散电阻降低,这被认为是引起交流腐蚀的一个重要因素。扩散电阻 R_s 可通过式(3)计算:

$$R_s = E_{AC} / I_{AC} \quad (3)$$

式中: E_{AC} 为交流电压; I_{AC} 为交流电流。

阴极保护影响管道防腐层缺陷处的扩散电阻,进而影响管道防腐层缺陷处的交流电流密度。高水平阴极保护引起防腐层缺陷处局部环境碱化,导致扩散电阻降低,较低的扩散电阻进一步提高了防腐层缺陷处的交流电流密度,使交流腐蚀进入自催化过程。同时,交流电对阴极保护具有去极化效应,在交流干扰下维持恒定阴极保护电位需要更大的阴极保护电流,如此循环,进而诱发交流腐蚀。

4.2 膜层氧化/还原机理

Büchler 和 Schöenich 在 2009 年提出了一种 AC 腐蚀的机械模型^[13,47]。该模型如图 6 所示,其中交变的阳极和阴极电流会导致碳钢表面钝化膜的形成和还原。交流电的正半波周期内,交流电对管道进行阳极极化,管道金属被氧化,表面形成一层钝化膜;交流电负半波周期内,钝化膜被还原成非保护性多孔氢氧化物(如 $Fe(OH)_2$)膜层,该膜层可能不会再次转换为钝化膜。接下来的阳极循环中,一层新的钝化膜在金属和氢氧化物之间生长。如此周而复始,每一次循环周期都导致金属腐蚀产物生产,管道基体不断被氧化腐蚀。另外,交流频率的影响也被考虑为是诱发腐蚀的一个因素,在其影响下,钝化可能并不会在完整的交流电周期内发生。那么在随后的正半波中,将可能发生铁的溶解或其他还原产物的氧化(或两者兼有),进而导致钢基体腐蚀。此种情况下,铁、氧化亚铁和氧化铁之间的转化以及钝化膜的破坏会被用来解释交流干扰加速腐蚀的行为^[14]。

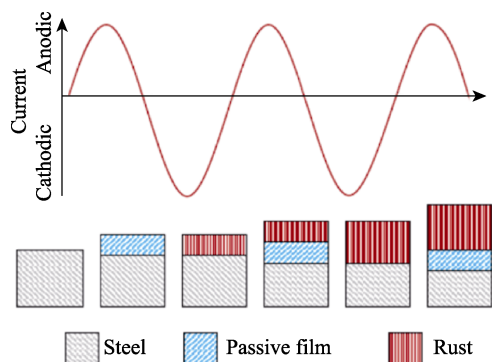


图 6 氧化/还原交流腐蚀机理

Fig.6 The oxidation/reduction AC corrosion mechanism

4.3 钝化膜力电损伤机理

交流干扰下,即使符合 -0.850 V (vs. CSE) 阴极保护标准,也可能发生交流腐蚀,阴极过度保护增加交流腐蚀风险^[48-52]。最近, Brenna 等人^[14,44]认为,阴极保护管道的交流腐蚀是由交流电导致碳钢表面钝化膜破坏后产生的高 pH 腐蚀,提出了碳钢在阴极保护下的两步交流腐蚀机理:碳钢表面的钝化膜在交流

电作用下发生力电损伤;碳钢表面的钝化膜破坏后,阴极保护造成的高 pH 环境导致碳钢腐蚀。

调节不同阴极保护水平,采集金属氧化膜两侧交流电形成的极限电场,随着阴极保护水平的提高,该电场增大。 -1.2 V 阴极保护下,金属氧化膜两侧的电场强度达到 $1.4 \times 10^6\text{ V/cm}$,超过临界值而导致钝化膜破裂。钝化膜破裂后,持续施加阴极保护,导致裸钢表面 pH 值升高,进而使管道钢电位-pH 处于高铁酸盐的活化区,加剧管道钢腐蚀。

金属氧化膜破裂后,金属在阴极过保护状态发生与电位无关的高 pH 腐蚀。根据 E -pH 图,这种高 pH 腐蚀可通过形成 $HFeO_2$ 发生。该机制解释了高阴极保护水平下管道钢的腐蚀现象。尽管阴极保护电流作用下,碳钢不会发生阳极氧化电化学反应,但可通过不依赖于电位的化学过程发生腐蚀^[53]。

5 结论

管线和高压输电线路常使用相同的路由通道,出现大量的高压/特高压输电线路、电气化铁路等基础设施与埋地油气管道交叉、平行的情况。油气管道受高压输电线路杂散电流干扰已成为常态,交流干扰引发的管道腐蚀问题受到越来越多的关注。国内外研究人员围绕埋地管道交流干扰形式、交流干扰的测试及评估、交流腐蚀特征及机理等方面开展了广泛研究。然而,多因素耦合作用下的交流干扰腐蚀行为复杂,交流腐蚀模型构建及机理分析均存在一定局限性,因此对于交流干扰腐蚀尚未形成统一认知,也未达成通用的评价准则和方法。近些年来,业界对交流腐蚀的理解及认识正在逐步提高,已有一些基于经验数据的交流腐蚀评价标准,然而,阴极保护管道交流腐蚀的众多过程、规律及机理仍不清楚,有待进一步深入研究。

1) 防腐层缺陷处在阴极保护电流作用下,导致局部高 pH 环境。阴极保护下的交流腐蚀是在高 pH 局部环境中发生的。钢表面最终的 pH 值取决于阴极保护水平(阴极保护电流密度)、土壤理化性质等。

2) 通过高于一定阈值水平的阴极保护电流密度,可以显著降低与防腐层缺陷有关的扩展电阻,较低的扩散电阻进一步提高了防腐层缺陷处的交流电流密度,使交流腐蚀进入自催化过程。同时,交流电对阴极保护具有去极化效应,交流干扰下保持恒定的阴极保护电位势必需要更大的阴极保护电流,因此加剧腐蚀。

3) 交流电流会破坏金属钝化膜,对金属的钝化行为产生影响,进而导致钝化金属的局部腐蚀。交流电可使管道钢在阴极保护高 pH 条件下形成的钝化膜减弱,这可用交流电的力电效应来理解。

4) 管道上感应交流电压可能导致阴极保护系统

故障,阴极保护电位不当,可能会加剧管道的交流电腐蚀。在存在交流干扰的情况下,即使符合 -0.850 V 标准,也可能发生腐蚀。钝化膜内存在的强交变电场内,电致伸缩应力可引起薄膜局部击穿。

参考文献:

- [1] SAIED M M. The capacitive coupling between EHV lines and nearby pipelines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1225-1231.
- [2] WILLIAMS J. Corrosion of metals under the influence of alternating current[J]. Mater prot performance, 1966, 5(2): 52.
- [3] RAHMAN N, ISMAIL M. Corrosion protection coating for buried pipelines: a short review[J]. World Applied Sciences Journal, 2012, 4: 524-531.
- [4] GUMMOW R A, WAKELIN R G, SEGALL S M. AC corrosion-a new challenge to pipeline integrity[C]// Proceedings of the corrosion-national association of corrosion engineers annual conference. NACE, 1998.
- [5] GUMMOW R A, WAKELIN R G, SEGALL S M. AC corrosion: A challenge to pipeline integrity[J]. Materials performance, 1999, 38(2): 24-31.
- [6] FLOYD R. Testing and mitigation of AC corrosion on 8 line: A field study[C]// Proceedings of the corrosion 2004. [s. l.]: OnePetro, 2004.
- [7] HANSON H R, SMART J. AC corrosion on a pipeline located in a HVAC utility corridor[C]// Proceedings of the corrosion 2004. [s. l.]: OnePetro, 2004.
- [8] WAKELIN R G, GUMMOW R A, SEGALL S M. AC corrosion--Case histories, test procedures, and mitigation[R]. NACE International, Houston, TX (United States), 1998.
- [9] GUMMOW R A, WAKELIN R G, SEGALL S M. AC corrosion: A new threat to pipeline integrity[C]// Proceedings of the international pipeline conference. [s. l.]: American Society of Mechanical Engineers, 1996.
- [10] WAKELIN R G. Investigation and mitigation of AC corrosion on a 300 mm diameter natural gas pipeline[C]// Proceedings of the proc NACE international conference corrosion/04. [s. l.]: NACE, 2004.
- [11] HAMLIN A. Alternating current corrosion[J]. Materials performance, 1986, 25(1): 55-58.
- [12] NIELSEN L V, NIELSEN K, BAUMGARTEN B, et al. AC induced corrosion in pipelines: detection, characterization and mitigation[C]// Proceedings of the corrosion 2004. [s. l.]: OnePetro, 2004.
- [13] BUCHLER M, SCHONEICH H. Investigation of alternating current corrosion of cathodically protected pipelines: Development of a detection method, mitigation measures, and a model for the mechanism[J]. Corrosion, 2009, 65(9): 578-586.
- [14] BRENNAN A, ORMELLESE M, LAZZARI L. Electro-mechanical breakdown mechanism of passive film in alternating current-related corrosion of carbon steel under cathodic protection condition[J]. Corrosion, 2016, 72(8): 1055-1063.
- [15] REGAULT I. AC corrosion induced by VHV electrical lines on polyethylene coated steel gas pipeline[C]// Proceedings of the corrosion-national association of corrosion engineers annual conference. [s. l.]: NACE, 1998.
- [16] LINHARDT P, BA LI G. AC corrosion: Results from laboratory investigations and from a failure analysis[J]. NACE international corrosion conference. [s. l.]: NACE, 2006.
- [17] NIELSEN L V, COHN P. AC corrosion and electrical equivalent diagrams[C]// 4th int Congr ceocor. Brussels, Belgium: CeoCor, 2000.
- [18] ISO-18086: 2015, Corrosion of metals and alloys—Determination of AC corrosion—Protection Criteria[S].
- [19] EN-15280: 2013, Evaluation of AC corrosion likelihood of buried pipelines applicable to cathodically protected pipelines[S].
- [20] ISO-15589-1: 2015. Petroleum, petrochemical and natural gas industries—Cathodic protection of pipeline systems—Part 1: On-land pipelines[S].
- [21] SP N. Mitigation of alternating current and lightning effects on metallic structures and corrosion control systems[M]. Houston TX: NACE, 2014.
- [22] SOUTHEY R, DAWALIBI F, VUKONICH W. Recent advances in the mitigation of AC voltages occurring in pipelines located close to electric transmission lines[J]. IEEE transactions on power delivery, 1994, 9(2): 1090-1097.
- [23] DU Y, JIANG Z, LU M, et al. Study on AC interference mitigation design methods for buried pipelines[C]// Proceedings of the corrosion 2013. [s. l.]: OnePetro, 2013.
- [24] LINDEMUTH D, KUSTOVA V, CRABTREE D, et al. Challenging AC corrosion mitigation system for 100-mile long pipeline[C]// Proceedings of the corrosion 2017. [s. l.]: OnePetro, 2017.
- [25] LI X, LIANG Y, DU Y, et al. Case study of AC interference on an urban gas pipeline: Field test, AC mitigation design and assessment[C]// Proceedings of the corrosion 2017. [s. l.]: OnePetro, 2017.
- [26] LALVANI S, LIN X. A theoretical approach for predicting AC-induced corrosion[J]. Corrosion science, 1994, 36(6): 1039-1046.
- [27] BOLZONI F M, GOIDANICH S, LAZZARI L, et al. Laboratory test results of AC interference on polarised steel[C]// Proceedings of the NACE corrosion 2003. [s. l.]: NACE, 2003.
- [28] NIELSEN L V, PETERSEN M B, BORTELS L, et al. Effect of coating defect size, coating defect geometry, and cathodic polarization on spread resistance: Consequences in relation to AC corrosion monitoring[C]// Proceedings of the Proc CeoCor, F, 2010.
- [29] BÜCHLER M, JOOS D. Die Wechselstromkorro-

- sions-geschwindigkeit[Z]. Energie-Wasser-Praxis, 2016.
- [30] TISDALE S L, NELSON W L. Soil fertility and fertilizers[J]. Soil science, 1966, 101(4): 346.
- [31] ABREU C M, CRISTÓBAL M J, MONTEMOR M F, et al. Galvanic coupling between carbon steel and austenitic stainless steel in alkaline media[J]. Electrochimica acta, 2002, 47(13-14): 2271-2279.
- [32] TORBATI-SARRAF H, POURSAEE A. Study of the passivation of carbon steel in simulated concrete pore solution using scanning electrochemical microscope (SECM)[J]. Materialia, 2018(2): 19-22.
- [33] BINDSCHEDLER D, STALDER F. Wechselstrominduzierte korrosionsangriffe auf eine erdgasleitung[J]. GWA gas, wasser, abwasser, 1991, 71(5): 307-13.
- [34] STALDER F. Pipeline failures[C]// Proceedings of the materials science forum. [s. l.]: Trans Tech Publ, 1997.
- [35] Fraga A O, Klunk M A, Oliveira A A, et al. Soil corrosion of the AISI1020 steel buried near electrical power transmission line towers[J]. Materials Research, 2014, 17(6): 1637-1643.
- [36] VETTER K, STREHBLOW H. Origin and form of corrosion pitting holes in the iron and theoretical implications for pitting corrosion[J]. Journal of pharmaceutical science and mathematics, 1970, 74(10): 1024-1035.
- [37] SATO N. A theory for breakdown of anodic oxide films on metals[J]. Electrochimica acta, 1971, 16(10): 1683-1692.
- [38] STREHBLOW H-H. Mechanisms of pitting corrosion [J]. Corrosion technology-new york and basel, 2002, 17: 243-286.
- [39] KULMAN F. Effects of alternating currents in causing corrosion[J]. Corrosion, 1961, 17(3): 34-5.
- [40] BERTOCCI U. AC induced corrosion. The effect of an alternating voltage on electrodes under charge-transfer control[J]. Corrosion, 1979, 35(5): 211-215.
- [41] YUNOVICH M, THOMPSON N G. AC Corrosion: Mechanism and Proposed Model[C]//2004 International Pipeline Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 183-195.
- [42] PEABODY A, VERHIEL A L. The effects of high-voltage AC transmission lines on buried pipelines[J]. IEEE Transactions on Industry and General Applications, 1971(3): 395-402.
- [43] MCCOLLUM B, AHLBORN G H. The influence of frequency of alternating or infrequently reversed current on electrolytic corrosion[J]. Transactions of the American institute of electrical engineers, 1916, 35(1): 301-345.
- [44] BRENN A, BERETTA S, ORMELLESE M. AC corrosion of carbon steel under cathodic protection condition: Assessment, criteria and mechanism. A review[J]. Materials, 2020, 13(9): 2158.
- [45] NIELSEN L V. Role of alkalization in AC induced corrosion of pipelines and consequences hereof in relation to CP requirements[C]// Proceedings of the corrosion 2005. [s. l.]: OnePetro, 2005.
- [46] CARPENTIER P, GREGOIR R, POURBAIX A. AC corrosion: Detection, investigations and mechanism [J]. Rapports techniques cebelcor, 2003, 330: 182-193.
- [47] BÜCHLER M, VOÛTE C, SCHÖNEICH H. Discussion of the mechanism of accorrosion of cathodically protected pipelines: The effect of the cathodic protection level[J]. CEOCOR, c/o CIBE, Brussels, Belgium, 2008.
- [48] BERTOLINI L, CARSANA M, PEDEFERRI P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current[J]. Corrosion science, 2007, 49(3): 1056-1068.
- [49] ORMELLESE M, BRENN A, LAZZARI L. Effects of AC-interference on passive metals corrosion[C]// Proceedings of the corrosion 2011 conference. Houston, TX: [s. n.], 2011.
- [50] 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.
- [51] BRENN A, BERETTA S, BOLZONI F, et al. Effects of AC-interference on chloride-induced corrosion of reinforced concrete[J]. Construction and building materials, 2017, 137: 76-84.
- [52] ZHU M, YUAN Y, YIN S, et al. Corrosion behavior of X65 and X80 pipeline steels under AC interference condition in high pH solution [J]. Int j electrochem sci, 2018, 13: 10669-10678.
- [53] XIAO Y, DU Y, TANG D, et al. Study on the influence of environmental factors on AC corrosion behavior and its mechanism[J]. Materials and corrosion, 2018, 69(5): 601-13.