

研究综述

杂散电流对埋地管道的腐蚀及 排流方式的研究进展

万红霞¹, 李婷婷¹, 宋东东², 陈长风¹

(1. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 暨南大学, 广州 510632)

摘 要: 随着人们对能源需求的不断增加, 输油管道和电力设施建设迅速发展, 由于空间地理位置限制, 管线与电力设施不可避免地并行铺设, 杂散电流对埋地管道的腐蚀问题日益突出。根据干扰源不同, 可将杂散电流分为直流干扰与交流干扰。分别从直流和交流杂散电流出发, 介绍了杂散电流的主要来源、形成原因及腐蚀危害; 了解了二者的腐蚀特征以及腐蚀速率差异。通过调研国内外杂散电流腐蚀的相关研究, 对直流腐蚀与交流腐蚀机理进行了系统论述与总结, 并对交流腐蚀速率低于直流腐蚀速率的原因进行了分析与探讨。分别介绍了直流杂散电流与交流杂散电流的排流方法与排流装置, 分析了每种排流方式的优缺点及适用条件, 为实际工况中排流方式的选取提供了参考。最后, 针对目前杂散电流腐蚀难点, 提出了有待解决问题的方法, 并对这一领域的研究方向及发展前景进行了展望, 为相关研究提供了借鉴。

关键词: 杂散电流; 埋地管线; 排流方式; 腐蚀行为

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)04-0125-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.04.012

Research Progress of Stray Current on Corrosion and Drainage Method of Buried Pipeline

WAN Hong-xia¹, LI Ting-ting¹, SONG Dong-dong², CHEN Chang-feng¹

(1. China University of Petroleum, Beijing, Beijing 102249, China; 2. Jinan University, Guangzhou 510632, China)

ABSTRACT: With the increasing demand for energy, the construction of underground oil and gas pipelines and electric power facilities has been developing rapidly in China. Due to the limitation of geographical location in space, pipelines and electric power facilities are inevitably laid in parallel, which makes the corrosion problem of buried pipeline caused by stray current become more and more serious. The pipeline corrosion of stray current can be divided into DC interference and AC interference according to the source of interference. Starting from dc stray current and AC stray current respectively, this paper introduces the main source of stray current, formation cause and corrosion hazard. The influence factors of direct current and alternating current are analyzed to understand the corrosion characteristics and corrosion rate difference between them. The mechanism of

收稿日期: 2020-07-23; 修订日期: 2021-01-21

Received: 2020-07-23; **Revised:** 2021-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51701055); 中国石油大学(北京)科研启动基金项目(2462018YJRC021)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51701055) and Science Foundation of China University of Petroleum, Beijing (2462018YJRC021)

作者简介: 万红霞(1986—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向石油管道腐蚀与防护。邮箱: wanhongxia88@163.com

Biography: WAN Hong-xia (1986—), Female, Doctor, Lecturer, Research focus: oil pipeline corrosion and protection. E-mail: wanhongxia88@163.com

引文格式: 万红霞, 李婷婷, 宋东东, 等. 杂散电流对埋地管道腐蚀及排流方式的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 125-134.

WAN Hong-xia, LI Ting-ting, SONG Dong-dong, et al. Research progress of stray current on corrosion and drainage method of buried pipeline [J]. Surface technology, 2021, 50(4): 125-134.

DC corrosion and AC corrosion is systematically discussed and summarized through the investigation of stray current corrosion, and the reason why the AC corrosion rate lags far behind the DC corrosion rate is analyzed and discussed. The drainage methods and devices for DC and AC stray currents are introduced respectively. The advantages, disadvantages and applicable conditions of each drainage mode are analyzed, which provides a reference for the selection of drainage mode in actual working conditions. At last, the methods to be solved are put forward according to the difficulties of study of stray current corrosion, and the research direction and development prospect of this field are prospected to provide reference for the research in related fields.

KEY WORDS: stray current; buried pipeline; drainage method; corrosion behavior

近年来,我国能源事业发展十分迅猛,各行业对于石油、天然气等能源的需求日益增加,能源需求的增长及能源结构的调整,使地下油气长输管道的铺设量显著增加^[1-2]。由于受到空间、地理环境限制,越来越多的埋地管线与高压电线、城轨供电系统等电力设施平行铺设,使埋地管道受到电力设施产生的杂散电流干扰^[3-6]。杂散电流会加速金属构件的腐蚀,使地下管道减薄,严重时会造成腐蚀穿孔,引发油气泄露,从而造成资源浪费与环境污染,甚至人员伤亡^[7-9]。

早在1969年, Schwalm 和 Sandor^[10]就已经发现了杂散电流的存在。根据杂散电流的大小和方向是否随时间变化,可分为动态杂散电流和静态杂散电流;根据干扰源,可分为直流杂散电流和交流杂散电流^[11-12]。通常情况下,地下管道受到的直流干扰主要来自于直流电气化铁路、直流电力线、直流整流器、阴极保护装置等;交流干扰主要来自于高压交流输电线,交流电气化铁路等^[13-17]。近几十年来,杂散电流的腐蚀问题日益严峻,国内外报道了多起由交、直流杂散电流引发的地下管道腐蚀案例。1993年,法国对铺设于400 kV交流输电线附近并经阴极保护的输气管道进行了检测,在该管道表面检测到31个腐蚀点^[18]。美国一输气管道平行铺设于交流高压输电线附近仅5个月,发现在管道表面有18处腐蚀穿孔^[19]。上海地铁2号线地下并行铺设的DN300燃气钢管受地铁运行过程中产生的杂散电流干扰,发生过多次燃气泄露事故^[20],造成严重的财产损失和安全问题。

国内外许多学者针对杂散电流腐蚀问题进行了很多研究,取得了一定的成果。但由于杂散电流腐蚀的影响因素众多,腐蚀机理也不是很明确,使人们对杂散电流腐蚀的了解有限,对其进行准确预测和防护也尤为困难。本文分别针对直流和交流杂散电流,阐述了杂散电流腐蚀的成因、影响因素及腐蚀机制,并讨论了杂散电流现场防护措施,对杂散电流腐蚀问题的研究前景及发展趋势进行了展望,为相关的研究提供借鉴。

1 杂散电流腐蚀的成因及危害

杂散电流的干扰源主要有:高压输电线路、接地为回路的输电系统、电气化铁路等。

对于输电线路来说,当线路出现单向短路或遇到

雷电天气导致系统故障时,会有电流通过输电系统的接地体,接地体电流流入地下,通过土壤电阻流向电阻更小的金属管道,使管道受杂散电流干扰的部分区域与未受电流影响的区域之间形成电位差,从而对管道造成电化学腐蚀。如果输电线通过电流为交流电,交流电流除直接泄露外,还可以产生交变磁场使其与并行铺设的埋地管道感应出交流电压,虽然这种通过电磁耦合方式产生的电压不是很大,但持续时间长,在交流电长期的干扰作用下,管道很容易出现腐蚀穿孔现象^[21-23]。

对于电气化铁路,电力的传输通常由架空电线或钢轨提供。电流回路通常是由附近变电站相连的运行轨道来实现,但由于轨道不可能完全与周围环境绝缘,通常会有弥散的电流在规定的回路之外流动。以国内地铁为例,多采用牵引供电系统,通过架空输电网供电,电流沿钢轨回流过程中,会有少量牵引电流通过走行轨进入大地。由于地铁等城轨交通运行范围大,因此轨道附近的整个区域几乎都受到杂散电流的影响,如地下输油管道、水管、电缆和煤气管等基础设施,会缩短其使用寿命。而且,土壤中各个区域的电阻率有差异,轨道与地下管道的绝缘电阻也不是固定值,因此杂散电流的流动区域和大小是不确定的,对杂散电流的预防和缓解造成了一定困难^[24-26]。

2 杂散电流腐蚀的影响因素

2.1 直流腐蚀的影响因素

稳态直流杂散电流的腐蚀速度快,电流密度很小的直流电就能导致严重的腐蚀^[27]。动态杂散电流的大小是随时间波动的,所以动态杂散电流的腐蚀相对复杂,腐蚀严重性不只受到施加电压的大小影响,还与电压的波动范围、周期等因素有关。另外,直流腐蚀结果往往与土壤性质(如电阻率、含水量等)具有耦合性。

2.1.1 电压对稳态直流杂散电流腐蚀的影响

大量研究表明,直流电压大小直接影响金属的腐蚀速率。熊娟等^[28]研究了直流电压大小对X80钢腐蚀的影响,发现初始腐蚀速率随电压增大而增大,在150 V和200 V时达到最大,之后随电压增大,腐蚀速率减小。秦润之等^[29]同样研究了高压直流干扰下

X80 钢的腐蚀行为, 结果表明, 在直流电位为 50、100、200、300 V 时, 对应的 X80 钢的腐蚀速率呈先增大后降低的趋势。出现以上现象的原因是, 不同电压下的电流密度随时间呈一定变化的规律。首先, 电流密度在几秒内急剧上升到峰值电流密度, 之后逐渐降低到一个平稳的值, 最后在长时间内维持稳定值不变。施加的直流电压越大, 其电流密度稳定值不一定越大, 而试样的腐蚀速率受到稳定电流密度值的影响, 与峰值电流密度无关。

2.1.2 电压对动态直流杂散电流腐蚀的影响

列车、地铁在运行过程中产生的动态直流电流大小随时间的变化, 处于一个不断波动的状态, 对金属腐蚀的影响比较复杂。张玉星等^[30]对地铁杂散电流进行研究, 发现外界干扰电压大小与腐蚀速率呈正比, 腐蚀速率随干扰电压波动范围的增大而增大, 并且在小电流密度长时间干扰下的腐蚀失重大于大电流短时间干扰下的腐蚀失重, 说明金属的腐蚀程度除了与电压、电流等参数有关外, 还与地铁运行的快慢密切相关。王新华等^[31]研究了涂层破损处电流与管地电位的关系, 结果表明, 涂层破损处电流与管地电位波动范围成正比。他们还研究了电压大小与频率对金属腐蚀程度的影响规律, 结果表明, 金属腐蚀速率受电压幅值的影响最大, 频率对腐蚀速率的影响较小。Qin 等^[32]研究表明, 动态电压周期 (T) 对 X70 钢的腐蚀速率有较大影响: 当 $T < 80$ s 时, X70 钢的腐蚀速率大约只有等量稳态直流下的 1%~7%; $T > 80$ s 时, 随着动态周期的增加, 腐蚀速率明显增加; $T > 1$ h 时, X70 钢的腐蚀速率几乎等于等量稳定直流电流腐蚀速率。

2.1.3 环境因素对直流腐蚀的影响

由于埋地管道在土壤中的环境复杂, 直流杂散电流对埋地金属管道的腐蚀受到土壤自身性质以及相对于干扰源的埋设位置影响。李长春等^[33]研究表明, 在一定电流密度的直流干扰下, 腐蚀速率随土壤电阻率的增大而减小。于家付等^[34]也指出, 土壤电阻率影响杂散电流在土壤中的分布, 腐蚀速率跟土壤的电阻率呈非线性反比关系。谭铮辉等^[35]的研究表明, 含水率越高, 杂散电流造成金属的腐蚀电流密度和失重速率越大。Xu^[36]测试了埋设深度、铁轨和埋地管道的并行长度, 绘制了腐蚀速率与不同干扰参数的非线性关系曲线。

2.2 交流腐蚀的影响因素

前人的很多研究表明, 交流杂散电流对腐蚀的影响远小于同等大小下的直流杂散电流。Fu^[37]通过对比相同电流密度下的直流电腐蚀速率和交流电腐蚀速率, 发现交流电只有不到 1% 的部分参与了腐蚀。Bertolini^[38]指出, 直流电流密度为 1 mA/cm^2 就足以引发严重的钢筋混凝土点蚀, 然而交流电流密度为

4 mA/cm^2 时却不会引发钢筋混凝土的任何腐蚀。McIntosh^[39]等研究表明, 在交流干扰 60 Hz 的频率下, 钢的腐蚀约为等效直流干扰下的 1%。虽然相同参数与环境下, 交流电对腐蚀造成的影响远小于直流电, 但交流电依然对金属构件的腐蚀产生影响。已有研究证明^[40-41], 交流电作为一种去极化剂, 具有减少阳极和阴极极化以及降低电化钝化的能力, 提高了金属的腐蚀速率。在早期, 人们对交流电缺乏认识时, 对交流电的研究多集中在电压上, 普遍认为峰值电压是影响金属腐蚀的重要因素, 金属的腐蚀程度与峰值电压成正比。后来, Song^[42]研究发现, 峰值电压并不直接影响金属腐蚀程度, 交流电频率和密度才是影响腐蚀的直接因素。另外, 交流电的不同波形对金属腐蚀的影响程度也不同。除去交流电的本身性质, 环境因素 (如 Cl^- 浓度、土壤性质等) 同样会影响交流电的腐蚀。

2.2.1 频率对交流电腐蚀的影响

交流电是电流方向和大小随时间呈周期性变化的电流, 所以交流电频率的改变会改变电场, 进而影响腐蚀体系。因此, 研究不同交流电频率对金属腐蚀动力学参数和金属表面状态的影响, 具有重要的意义。与日常生活密切相关的电力设施的交流电频率一般为 50 Hz 或 60 Hz, 但非线性用电设备的负载也会产生高次谐波和瞬时频率。

朱敏^[43]研究表明, 当 AC 频率从 50 Hz 增大到 400 Hz 时, 金属的腐蚀速率随频率的增加而降低, 电位偏移量也随频率的增加而减小, 高频时的电位接近未施加 AC 时的电位大小, 阴、阳极大化曲线的振荡幅度与频率呈负相关关系, 即 AC 频率越高, 对腐蚀的影响越小。姜子涛^[44]同样发现, 交流电会引起金属腐蚀电位的偏移, 并且阴、阳极的 Tafel 斜率之比会影响电位偏移的方向, 电位的偏移量和波动幅度大小随频率的增大而减小。Qin 等^[45]研究表明, 低频交流电作用下, X80 钢的腐蚀速率随频率的增大而迅速减小, 但在高频交流电作用下, 腐蚀速率随频率增大而缓慢减小, 交流电会在金属与介质界面上 (双电层) 产生一个震荡作用, 在更高的频率下, 交流电对其干扰显著, 但氧化还原反应在如此短的时间内难以发生, 因而腐蚀速率低。但有研究表明, 交流电频率对腐蚀的影响存在一个临界值, 在频率低于该值时, 腐蚀速率随频率的增加而增大, 当频率高于该值时, 腐蚀速率随频率的增加而减小, 临界值的取值与腐蚀体系有关, 腐蚀体系不同, 临界值的取值也不同^[46]。

2.2.2 电流密度对交流电腐蚀的影响

研究表明, 交流电流密度与金属腐蚀密切相关。Wakelin^[47]发现, 当交流电流密度小于 20 A/m^2 时, 钢不会发生腐蚀; 交流电流密度为 $20 \sim 100 \text{ A/m}^2$ 时, 腐蚀的发生是不确定的; 当交流电流密度大于 100 A/m^2 时, 会出现严重的腐蚀。Fu^[37]研究发现, 交流电流密

度较小时,腐蚀速率随交流电流密度缓慢增加,当交流电流密度较高时,腐蚀速率随电流密度的增加而大幅度增加。从腐蚀形态来看,交流电流密度较低时,试样表面以均匀腐蚀为主;交流电流密度较大时,试样表面出现点蚀坑,随着电流密度的进一步增大,点蚀坑合并在一起致使金属减薄。Guo等^[48]研究表明,当交流电流密度低于一定值时,腐蚀速率随交流电流密度增大近似呈线性关系增加;当交流电流密度高于这个值时,腐蚀速率上升趋势略有减缓。从腐蚀形貌同样发现,在交流电流密度较小时,以均匀腐蚀为主,随着交流电流密度增加,腐蚀形态由均匀腐蚀转变为局部腐蚀,表面出现蜂窝状腐蚀现象,试样表面出现多且深的点蚀坑。

交流电除了会直接影响埋地管线腐蚀外,也会通过破坏阴极保护(CP)系统的性能,影响腐蚀。AC使施加在管道上的CP电位偏离设计值,使阴极保护效果因交流电的干扰而减弱甚至失去保护能力,进而影响管道的稳定运行^[49]。Xu^[50]研究表明,阴极保护电位为 -0.85 V 时,AC的存在减弱了阴极保护的效果,导致管道发生腐蚀,如果阴极保护电位的负值越低,试样会受到完全保护。Fu^[51]证明,当交流电流密度低于 20 A/m^2 时, -0.95 V 的CP电位能够对钢提供完全保护;但当交流电流密度大于 20 A/m^2 时,CP电位的负值足够低才能保护试样免受腐蚀。但随着对交流腐蚀与阴极保护的深入研究发现,阴极保护水平的提高反而会加大交流腐蚀的风险。在2018年,NACE^[52]对交流影响下的阴极保护标准进行了修订:当阴极保护电流密度 $J_{\text{DC}} \geq 1\text{ A/m}^2$ 时,交流电流密度存在上限值,在 $J_{\text{AC}} < 30\text{ A/m}^2$ 时,阴极保护会对管道进行有效保护,交流电流密度超过这个阈值,阴极保护则会加大交流腐蚀。而当 $J_{\text{DC}} < 1\text{ A/m}^2$ 或 $J_{\text{AC}} < 100\text{ A/m}^2$ 时,阴极保护会降低交流腐蚀的风险^[53]。综上,过高或过低的阴极保护水平都会加速交流腐蚀,所以当存在AC干扰时,需要依据相关标准及实际情况,合理设计适当的阴保电位或电流密度值,以保护管道免遭腐蚀。

交流电除了会引发金属发生阳极溶解外,也会影响H的析出,从而影响局部腐蚀,如应力腐蚀的发生。Wan^[54]研究了X80钢在近中性环境中存在交流干扰下的应力腐蚀(SCC)行为,发现X80钢的SCC敏感性随交流电流密度的增加而增加,交流电作用下,X80钢SCC机制为阳极溶解和氢脆的混合机制。Zhu^[55]研究了高pH环境中交流电对应力腐蚀的影响,交流电促进SCC裂纹萌生,并且在高pH时,SCC敏感性同样随交流电流密度的增加而增加。

2.2.3 交流电波形对腐蚀的影响

交流电存在多种波形,如正弦波形、三角波、方波等。不同波形对金属腐蚀的影响各异,有研究证明^[56],在均方根电压值相同的情况下,三角波对金属

的钝性破坏最大,正弦波居中,方波最小。在金属腐蚀速率方面,Chin研究表明^[57],在AC频率为60 Hz的情况下,不同波形的交流电对铁的腐蚀速率影响大小为:三角波>正弦波>方波。出现这种现象的原因主要是不同波形的交流电的峰值电压存在差异,从而影响腐蚀速率。郭敏等^[58]研究了不同交流电波形对铝箔的腐蚀形貌及电化学的影响,结果表明,正弦波、三角波在铝箔表面产生的孔直径较大,但深度较浅,没有出现腐蚀穿孔现象,方波则使铝箔表面更易产生腐蚀穿孔,方波的电流变化率大于正弦波和三角波的电流变化率。

2.2.4 环境因素对交流腐蚀的影响

Tang^[59]研究了在Cl⁻环境中交流电对钢纤维混凝土的影响,结果表明,Cl⁻降低了钢纤维抗交流干扰腐蚀能力,并且电解质的Cl⁻浓度决定了钢纤维的腐蚀强度,Cl⁻浓度越高,钢纤维的点蚀敏感性越高。Fu^[37]通过研究不同涂层缺陷大小对交流腐蚀的影响,认为在涂层小缺陷处,会产生高的交流电流密度,而且腐蚀产生的阳离子很难从局部缺陷中扩散出来,导致小的涂层缺陷受交流腐蚀的影响更严重。Kuang^[60]研究了高pH和中性pH环境中交流腐蚀的敏感性,结果表明,低AC电流密度下,在高pH环境中,试样表面形成的致密的钝化膜会降低交流腐蚀的风险,而在中性pH环境中,试样表面产生的腐蚀产物不足以保护试样免受腐蚀。Nielsen^[13]推测,若受交流影响的土壤中含有碱土离子(如Ca²⁺和Mg²⁺),会与阴产生的OH⁻反应,生成沉淀,使土壤的电阻率升高,pH值降低,从而降低交流腐蚀的敏感性。

3 杂散电流的腐蚀机理研究

3.1 直流杂散电流的腐蚀机理

关于稳态直流杂散电流的腐蚀机理已经很成熟,其腐蚀属于电化学腐蚀过程。对于埋地管道来说,杂散电流通过土壤电解质流经管道,其电子从管道的阴极流出,流向管道的阳极。在阴极区,管道不会发生腐蚀,当阴极区电位过正时,在管道表面会发生得电子的还原反应,在无氧环境中会发生析氢反应,有氧环境中则发生氧气得电子的吸氧反应。阳极区电位较负,管道上的金属(如Fe)发生失电子的氧化反应,造成管道上的金属被氧化,以氧化物的形式迅速腐蚀,导致管体减薄甚至穿孔^[61]。直流电的腐蚀动力学符合法拉第定律,根据法拉第定律,1 A的直流电可在一年内消耗近10 kg钢。而在现场环境中,流经土壤到达管道上的杂散电流可达到数十甚至上百安培,因此在直流电的作用下,壁厚达7~8 mm的钢管几个月的时间便会发生腐蚀穿孔现象^[27]。

不同于稳态直流杂散电流,动态直流杂散电流的大小随时间变化,其腐蚀机制也要比稳态下复杂。稳

态直流电流在金属管道的流入和流出是在不同区域, 而动态直流电在管道表面产生的阴极区和阳极区为同一区域, 即氧化反应与还原反应在金属表面同一位置交替进行。很多学者只考虑金属表面发生的氧化反应, 采用稳态直流电的腐蚀机理来解释动态直流电对腐蚀的影响, 这样就忽略了交替流入的阴极电流对腐蚀过程的影响, 与真实的腐蚀情况有很大出入^[38,62-63]。虽然交流电的大小也是随时间变化, 但动态直流电与交流电在频率范围方面有很大不同, 而且国内外对于交流腐蚀机理的研究仍存在较大的争议, 所以交流电的腐蚀机理也不适用于动态直流腐蚀, 对于其腐蚀机理有待更多学者进行深入研究^[16]。

3.2 交流杂散电流的腐蚀机理

一直以来, 人们对交流腐蚀进行了大量的研究, 对其腐蚀规律及影响因素也有了初步的认识, 但由于交流电的复杂性, 至今还没有统一的理论来解释交流腐蚀的机理。总结前人的一些研究, 可以将交流电的腐蚀机理模型大致分为两类。一类为强电场诱导模型, 用于解释交流腐蚀的成因及导致的腐蚀现象; 另一类为电化学模型, 因为交流腐蚀的实质是电化学腐蚀, 所以前人通过电化学模型对交流电的腐蚀机理有了部分认识^[64]。

强电场诱导模型是指交流电发生作用时, 其周围会产生一个强度很高的电场, 此电场强度比自然极化过程的内电场强度高得多, 进而影响腐蚀发生的进程。另外, 根据电磁感应定律, 与输电线路平行铺设的埋地管道上会感应出交流电压, 电压幅值比金属自然极化的电位高几十倍, 并且交流电的变化周期远远小于化学反应发生的时间, 这将增加反应物的动能和反应离子之间的碰撞机会。所以在交流电产生的高电场作用下, 化学反应进行的速度以及某些反应发生的可能性增加, 从而加速了管道的腐蚀^[65]。

交流腐蚀多发生在管道的局部位置, 这是由于不同管段的土壤电导率不同, 管道涂层破损的位置也具有随机性, 导致管体不同区域的交变电场强度不同, 管体某些区域的感生电压要比其他区域大很多, 所以交流电会对管道造成局部腐蚀。强电场诱导模型解释了交流电加速金属腐蚀以及出现局部腐蚀的原因, 但对于其机制的深入了解, 需要通过电化学模型进行讨论。

电化学模型最为典型的三种模型为: 整流模型、非线性模型、震荡模型。McCollum^[66]提出了一种整流机制, 他们认为当金属在交流电作用下经历阳极和阴极极化时, 由于阳极和阴极极化的不对称性, 法拉第电流被整流, 产生了净法拉第电流。Goidanich 等人^[67]将交流腐蚀也归因于阴阳极反应的不对称, 他们认为交流电正半周内金属氧化过程中产生的金属离子在负半周内不能完全还原, 从而使金属发生溶解。但 Williams 并不认同整流机制^[68], 他认为交流腐蚀

的本质原因是金属在交流电正半周期发生阳极氧化, 从而造成金属离子的扩散。Bruckner^[69]通过研究恒定电流和电压下金属的腐蚀, 没有在金属的腐蚀表面发现整流迹象。“整流模型”的前提是金属与溶液界面发生的电化学反应可逆, 但当反应不完全可逆时, “整流模型”不足以解释交流电流引发腐蚀的原因。但它的提出使人们对交流电腐蚀有了初步的认识。

在法拉第整流效应的基础上, 一些学者采用活化下的动力学理论对 Butler Volmer 方程进行修正, 用来模拟叠加交流电后的腐蚀行为, 修正后的数学模型即非线性模型^[70-73]。根据交流腐蚀的非线性模型, 极化曲线阳极和阴极 Tafel 斜率的比值 ($r=\beta_a/\beta_c$) 对腐蚀速率和腐蚀电位有很大的影响。如果 $r<1$, 腐蚀电位减小; $r>1$, 则腐蚀电位增大; $r=1$, 腐蚀电位不变。在 $r\neq 1$ 时, 增大交流电电压, 腐蚀电位的偏移量增大。另外, 平衡条件下, 金属的腐蚀电流密度 (J_{corr}) 随 r 值的增加, 呈指数级增长。在混合控制条件下, 腐蚀电流密度与氧的极限扩散电流密度的比值 (J_{corr}/J_L) 随交流电压的增大而线性减小, 由于反应存在扩散控制过程, 金属的腐蚀电流密度存在上限值。“非线性模型”是根据电化学理论推导出的交流电的非线性腐蚀规律, 并且在一系列的实验基础上得到了认证, 但是“非线性模型”没有解释为何交流电会出现这种非线性腐蚀行为, 对于交流电的腐蚀机理还需要进行更深入的探讨。

根据一些现场调研的案例发现, 交流电在埋地管道金属/介质界面的振荡作用诱发管道涂层缺陷处发生交流腐蚀。其作用机理为, 在施加交流电时, 交变电场力作用于溶液中的反应物, 产生振荡效应。在没有干扰的情况下, 溶剂化离子在溶液中的迁移速率一般很慢, 而交流电在双电层中的振荡效应使离子加速迁移, 从而缩短了反应物自由碰撞的路径, 增加了反应发生的机会, 金属腐蚀的可能性增强。此外, 在阴极保护作用下, 管道表面会产生大量 OH^- , 导致附近 pH 升高, 在高 pH 的环境中, 交流电在金属界面处的震荡作用通过破坏金属表面的氧化膜进而对管道造成腐蚀。“振荡模型”从热力学方面解释了交流腐蚀的原因, 并且考虑了阴保作用下发生交流腐蚀的情况, 但“振荡模型”过于简单, 讨论过于浅显, 没有涉及交流电对金属腐蚀的动力学影响。

以上模型对于特定条件下交流腐蚀发生的原因以及交流腐蚀的规律作出了解释, 为现场交流腐蚀的分析提供了理论依据。但是, 前面大量研究表明, 相同杂散电流密度下, 交流电的腐蚀程度远远小于直流电的腐蚀, 对于这种现象出现的原因, 以上机制都未进行合理解释。近些年来, 许多研究学者从双电层角度出发, 对其进行了深入探讨与研究。

交流电的很大一部分电流未参与腐蚀过程, 这是因为交流电对金属与溶液界面 (即双电层) 的影响分为法拉第电流与非法拉第电流^[59,74-77]。交流电作用于

双电层时,大部分是非法拉第电流参与充放电过程,通常比法拉第电流要高得多^[78]。双电层理论解释了交流电对腐蚀的影响远小于直流电影响的原因,推动了交流腐蚀机制的进一步发展,但目前对于双电层理论的研究尚未成熟。虽然很多研究学者运用双电层理论来解释交流电的腐蚀现象,但并未区分交流腐蚀过程中法拉第电流的确切占比。所以,如何从实验中计算出交流电参与腐蚀的法拉第电流,是探索交流腐蚀机理的一个重要突破点。Tang^[77]根据并联电路理论,应用数学模型推导求解出法拉第电流,并利用电阻与电容元件设计了真实电路进行验证。但这种方式在求解时需要获得电容 C 和电阻 R 的具体数值,而在实际交流电的腐蚀过程中,并不能直接测量金属导体与溶液接触形成的双电层电容以及电荷转移电阻,所以还需要通过其他方式来求解数值。作者试图利用电化学阻抗谱来模拟交流电的腐蚀过程,拟合出电化学参数,获得电极与溶液界面的结构性质,如电荷转移电阻、双电层电容等。这种方式的不足在于阻抗测量时,施加的扰动电压的幅值很小,不能模拟幅值大一些的交流电。另外,电极表面反应过程太复杂,简单的电路可能并不能接近真实情况,所以计算结果与真实情况会存在一定偏差。

4 杂散电流腐蚀的防护措施

为了避免杂散电流腐蚀造成的经济损失,应根据杂散电流的勘测结果,将金属管道避开杂散电流干扰密集区铺设。但由于地理空间位置有限,地下油气管道的输送距离也非常长,有的长输管线甚至长达几万千米,所以地下管道不可避免地要与输电设备、电力装置等并行铺设,进而或多或少受到杂散电流的腐蚀。因此,必须采取排流措施,安装排流装置,以便控制和减缓杂散电流对金属埋地管道的影响。根据杂散电流的分类和不同性质将排流方式分为直流排流和交流排流两种。

直流排流主要有直接排流、极性排流、接地排流和强制性排流四种方式^[29,79-80]。

直接排流:用绝缘电缆直接将保护体(埋地管道)与直流干扰源(铁轨)相连,从而将杂散电流从管道上引出,使其流回干扰源。此法适用于干扰源电位极性稳定的情况,优点是方法简单,实用经济,排流效果佳。缺点是,当干扰源的电位高于管道电位时,会将更多的杂散电流引入轨道,造成更严重的腐蚀。由于电流干扰源(如铁轨)的电位常有波动,在某些情况下会大于管道电位,直接排流方法的使用风险较大,常受到限制。

极性排流:在直接排流的基础上,在电流干扰源与埋地管道之间串入一个二极管,从而在排流线路中形成一个单向导通的极性排流器,只允许杂散电流从管道流向干扰源,而干扰源电流无法反方向流入管

道。此装置结构简单,安装便捷,排流效率高,在干扰电位极性正负交替波动的情况下仍然适用。缺点是,排流效果受到干扰源与埋地管道之间距离的影响,在干扰源距离管道较远时,排流效果变差。

接地排流:通过导线将管道与埋地体(即辅助阳极)连接,杂散电流从管道上流出,进入电阻更小、电位更负的埋地体。此法的应用范围广,尤其适用于难以直接向干扰源排流(如直接排流、极性排流)的管道,并且接地点的设置灵活,操作方法简单,费用低。但是对接地体的要求严格,花费成本大,排流效率也要低于直接向干扰源排流的方式。

强制性排流:在管道与杂散电流干扰源(如铁轨)之间串联一个整流器,引入直流电流,在外加直流的作用下,加速杂散电流的排流。这种方法适用于管地电位极性正负交替变化、管道与铁轨之间电位差较小的情况。优点是应用广,保护范围大,并且具有阴极保护的效果。缺点是需要外加电源,对铁轨的电位影响大,甚至加剧铁轨的腐蚀。

2018 年,国内研制成功了首套高压直流干扰大功率直流排流器^[81],该排流器不仅将直流通流能力提高了十几倍,而且不会影响阴极保护系统的操作,同时满足常规固态去耦合器的参数设置,对于交流干扰有一定的排流效果,解决了直流干扰与交流干扰同时存在下的排流难题,使我国在排流技术这方面取得了重大突破。目前,在工程上应用的交流排流方式主要有:直接排流法、隔直排流法、负电位排流法三种方式^[82]。

直接排流法:与直流杂散电流的直接排流法相似,交流杂散电流的直接排流法是通过绝缘电缆将管道与低电阻地床直接连接,为了防止杂散电流逆流,必须要求地床接地电阻小于管道接地电阻。此法只适用于不施加阴极保护的管道,优点是操作简单,费用低且排流效率高。缺点是容易将阴极保护电流引入地床,从而造成阴极保护电流的流失,应用常受到限制。

隔直排流法:在直接排流法的基础上进行了改进,在管道与地床之间接入一个阻隔直流的元件(如电容器、二极管),从而在排流的同时防止了阴极保护电流的流失,适用于存在阴极保护的管道。优点是应用广泛,排流效率高;缺点是结构复杂,花费成本高。

负电位排流法:利用导线将管道与电位更低的牺牲阳极连接,将管道上的杂散电流引入牺牲阳极。这种方法优点是兼具排流和阴极保护的双重作用,缺点是对牺牲阳极的要求高,一旦牺牲阳极发生极性逆转,会进一步加速管道的腐蚀。

目前应用的交流排流装置主要有两种,第一种是固态去耦合器,它可以传导交流电,同时可以在管道电压过高时提供保护。但由于其接地极较长,接地电阻容易受到工况环境的影响,导致其排流效果欠佳^[52]。第二种是钳位式排流器,安装在管道与排流地床之

间,杂散电流通过排流地床导出,可以有效降低管道上的交流电压。但这种排流装置对接地材料有严格限制,需要和管道材料一致,而且此装置在强交流干扰下的排流效果不佳且抗电冲击性能差^[83-84]。对于交流排流装置来说,接地电阻、接地材料等问题亟需解决,还应结合工况环境,进一步完善、设计合理的交流排流装置。

通过以上对于排流方法的讨论可以看出,现场环境情况和工况不同,应用时还需要考虑操作难度、造价成本。在实际应用前,需全面调查影响排流的众多因素,另外,还需调研排流保护工作过程中对输电系统电信号以及铁路的传输信号造成的干扰,选择既经济又高效的排流方式。

5 杂散电流的重点问题及发展趋势

虽然对杂散电流的研究已经有很多年的历史,但一直以来对它的认识仍处于初级阶段,而且杂散电流腐蚀的风险评价手段与防护方法尚不成熟,使杂散电流对埋地管道腐蚀的影响日益严峻。从目前的研究现状来看,杂散电流腐蚀中的一些重大问题并未得到有效解决,还需从以下两个方面展开研究。

1) 杂散电流的腐蚀机理尚不明确。虽然近些年人们对杂散电流进行了众多实验与研究,但对于其腐蚀的根本原因一直没有确切的结论,特别是交流杂散电流以及动态直流杂散电流对金属腐蚀动力学行为的影响机制,所以对于杂散电流腐蚀的特征也不能从机理上给出合理的解释。因此,杂散电流腐蚀问题的研究重点应是对其腐蚀机制的探究。随着科技的发展,借助现代先进的科学手段,计算出交流电参与腐蚀的法拉第电流,是探索交流腐蚀机理的一个重要突破点。

2) 杂散电流腐蚀风险的评估与防护。电力系统的快速发展使杂散电流腐蚀问题日益严重,杂散电流对埋地管道腐蚀的影响涉及众多方面,使腐蚀风险的评估与防护日渐困难。如何做到对杂散电流的精准测量以评估发生腐蚀的风险,以及开发操作简单、经济适用的排流方法,也是未来研究的热点之一。可以根据不同的环境与工况来提取关键影响参数,建立相应的数据库以供参考。同时,要想真正解决工程问题,需要将理论与实际相结合,在不断的探索与应用中实现对杂散电流腐蚀的控制与防护。

参考文献:

- [1] 刘金英, 张伟, 孙晓辉. 石油长输管道腐蚀与防护措施[J]. 现代职业安全, 2019(8): 83-85.
LIU Jin-ying, ZHANG Wei, SUN Xiao-hui. Corrosion and protective measures for long-distance oil pipeline[J]. Modern occupational safety, 2019(8): 83-85.
- [2] BRITO A J, ALMEIDA A T D. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines[J]. Reliability engineering & system safety, 2009, 94(2): 187-198.
- [3] STANDARD N. Recommended practice control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems[J]. Corrosion engineering, 1970, 19(8): 346-362.
- [4] MOVLEY C M. Pipeline corrosion from induced A. C. Two UK case histories[C]//Proceedings of the corrosion 2005. Houston: NACE, 2005.
- [5] 王新华, 杨国勇, 黄海, 等. 埋地钢质管道交流杂散电流腐蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(4): 293-297.
WANG Xin-hua, YANG Guo-yong, HUANG Hai, et al. AC stray current corrosion law of buried steel pipeline[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(4): 293-297.
- [6] ABDEL-GAWAD N M K, EL DEIN A Z, MAGDY M. Mitigation of induced voltages and AC corrosion effects on buried gas pipeline near to OHTL under normal and fault conditions[J]. Electric power systems research, 2015, 127: 297-306.
- [7] 卿永长, 杨志伟, 鲜俊, 等. 交流电和微生物共同作用下 Q235 钢的腐蚀行为[J]. 金属学报, 2016, 52(9): 1142-1152.
QING Yong-chang, YANG Zhi-wei, XIAN Jun, et al. Corrosion behavior of Q235 steel under the interaction of alternating current and microorganisms[J]. Acta metallurgica sinica, 2016, 52(9): 1142-1152.
- [8] 刘凯, 马丽敏, 陈志东, 等. 埋地管道的腐蚀与防护综述[J]. 管道技术与设备, 2007(4): 39-41.
LIU Kai, MA Li-min, CHEN Zhi-dong, et al. Corrosion of buried pipeline and its anticorrosion[J]. Pipeline technique and equipment, 2007(4): 39-41.
- [9] 张春生, 申龙涉, 郭慧军, 等. 埋地油气管道外腐蚀原因及防腐技术的研究进展[J]. 当代化工, 2011, 40(2): 99-102.
ZHANG Chun-sheng, SHEN Long-she, GUO Hui-jun, et al. External corrosion causes of buried oil and gas pipeline and research progress in anti-corrosion technology[J]. Contemporary chemical industry, 2011, 40(2): 99-102.
- [10] SCHWALM L, SANDOR G. Stray current-the major cause of underground plant corrosion[J]. Materials perform, 1969, 6: 31-36.
- [11] 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, 30(8): 515-518, 525.
SONG Yin-wei, WANG Xin-hua, HE Ren-yang, et al. Status in research on stray-current corrosion of buried steel pipelines[J]. Corrosion and protection, 2009, 30(8): 515-518, 525.
- [12] 李威. 地铁杂散电流的监测与防治[J]. 城市轨道交通研究, 2003(4): 54-58.
LI Wei. Monitoring and prevention of subway stray current[J]. Urban mass transit, 2003(4): 54-58.
- [13] 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. Houston: NACE, 2005.
- [14] XIAO H, LALVANI S B. A linear model of alternating voltage-induced corrosion[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2008, 155(2): 69-74.
- [15] BRENN A, BERETTA S, BOLZONI F, et al. Effects of AC-interference on chloride-induced corrosion of reinforced concrete[J]. Construction building materials, 2017, 137(15): 76-84.
- [16] 覃慧敏, 杜艳霞, 路民旭, 等. 轨道交通对埋地管道动态直流干扰腐蚀的研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(6): 653-660.
- QIN Hui-min, DU Yan-xia, LU Min-xu, et al. Research progress in corrosion of buried pipeline under dynamic DC stray current interference from urban rail transit[J]. Corrosion science and protection technology, 2018, 30(6): 653-660.
- [17] POURBAIX A, CARPENTIER P, GREGOIR R. Detection and assessment of alternating current corrosion[J]. Materials performance, 2000, 39(3): 34-37.
- [18] 胡士信, 路民旭, 杜艳霞, 等. 管道交流腐蚀的新观点[J]. 腐蚀与防护, 2010(6): 10-15.
- HU Shi-xin, LU Min-xu, DU Yan-xia, et al. The pipeline communicates new ideas about corrosion[J]. Corrosion & protection, 2010(6): 10-15.
- [19] 吴荫顺, 曹备. 阴极保护和阳极保护: 原理、技术及工程应用[M]. 中国石化出版社, 2007: 223.
- WU Yin-shun, CAO Bei. Cathodic and anodic protection: Principles, techniques and engineering applications[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007: 223.
- [20] 颜达峰, 刘乃勇, 袁鹏斌, 等. 地铁维修基地杂散电流对埋地钢质管道的腐蚀及防护措施[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(8): 739-742.
- YAN Da-feng, LIU Nai-yong, YUAN Peng-bin, et al. Corrosion of buried steel pipeline caused by stray current from subway maintenance base and protective countermeasures[J]. Corrosion & protection, 2013, 34(8): 739-742.
- [21] 熊娟, 罗敏, 冯兵. 高压直流干扰下管材在西南土壤中的腐蚀规律研究[C]//2018 年全国天然气学术年会论文集. 福州: 中国石油学会天然气专业委员会, 2018.
- XIONG Juan, LUO Min, FENG Bing. Study on corrosion law of pipe in southwest soil under high voltage and DIRECT current interference[C]//Proceedings of the 2018 national natural gas academic annual conference. Fuzhou: Natural Gas Professional Committee of China Petroleum Society, 2018.
- [22] 李自力, 孙云峰, 刘静, 等. 埋地油气管道交流干扰腐蚀及防护研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(5): 379-380.
- LI Zi-li, SUN Yun-feng, LIU Jing, et al. Research progress of AC interference corrosion and protection of buried oil and gas pipelines[J]. Corrosion science and protection technology, 2011, 23(5): 379-380.
- [23] ABDEL-GAWAD N M K, EL DEIN A Z, MAGDY M. Mitigation of induced voltages and AC corrosion effects on buried gas pipeline near to OHTL under normal and fault conditions[J]. Electric power systems research, 2015, 127: 297-306.
- [24] TANG K. Stray current induced corrosion of steel fibre reinforced concrete[J]. Cement concrete research, 2017, 100: 445-456.
- [25] 饶桢毓, 朱万方. 地铁设计中石油天然气管道杂散电流防护探讨[J]. 电气化铁道, 2019(6): 75-77.
- RAO Yan-yu, ZHU Wan-fang. Discussion on the protection of stray current of CNPC natural gas pipeline in subway design[J]. Electric railway, 2019(6): 75-77.
- [26] 谢意, 曾洁. 地铁杂散电流腐蚀防护要点[J]. 通讯世界, 2019(7): 293-294.
- XIE Yi, ZENG Jie. Key points of subway stray current corrosion protection[J]. Telecom world, 2019(7): 293-294.
- [27] ANDRADE C, MARTINEZ I, CASTELLOTE M. Feasibility of determining corrosion rates by means of stray current-induced polarization[J]. Journal of applied electrochemistry, 2008, 38(10): 1467-1476.
- [28] 熊娟, 张文艳, 杜艳霞, 等. 高压直流干扰下管线钢在西南土壤中的腐蚀规律研究[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(12): 97-102.
- XIONG Juan, ZHANG Wen-yan, DU Yan-xia, et al. Corrosion law study on pipeline steel in southwestern soil under high voltage direct current interference[J]. Oil-gas field surface engineering, 2019, 38(12): 97-102.
- [29] 秦润之, 杜艳霞, 路民旭, 等. 高压直流干扰下 X80 钢在广东土壤中的干扰参数变化规律及腐蚀行为研究[J]. 金属学报, 2018, 54(6): 886-894.
- QIN Run-zhi, DU Yan-xia, LU Min-xu, et al. Study of interference parameters variation regularity and corrosion behavior of X80 steel in Guangdong soil under high voltage direct current interference[J]. Acta metallurgica sinica, 2018, 54(6): 886-894.
- [30] 张玉星, 杜艳霞, 路民旭. 动态直流杂散电流干扰下埋地管道的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(9): 772-774.
- ZHANG Yu-xing, DU Yan-xia, LU Min-xu. Corrosion behavior of buried pipeline under dynamic DC stray current interface[J]. Corrosion & protection, 2013, 34(9): 772-774.
- [31] 王新华, 刘菊银, 何仁洋, 等. 轨道交通动态杂散电流对埋地管道的干扰腐蚀试验[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(3): 193-197.
- WANG Xin-hua, LIU Ju-yin, HE Ren-yang, et al. Disturbed corrosion of buried gas pipe-lines induced by rail traffic dynamic stray current[J]. Corrosion & protection, 2010, 31(3): 193-197.
- [32] QIN H, DU Y, LU M, et al. Effect of dynamic DC stray current on corrosion behavior of X70 steel[J]. Materials and corrosion, 2020, 71: 35-53.
- [33] 李长春, 李志宏, 王晨, 等. 埋地钢质管道直流杂散电流腐蚀机理及影响因素研究[J]. 中国新技术新产品, 2017(1): 50-51.
- LI Chang-chun, LI Zhi-hong, WANG Chen, et al. Study on the mechanism and influencing factors of DC stray current corrosion of buried steel pipeline[J]. New techno-

- logy & new products of China, 2017(1): 50-51.
- [34] 于家付, 谢娜娜, 吴巍巍, 等. 埋地金属管道杂散电流腐蚀与防护[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2013(2): 94-98.
YU Jia-fu, XIE Na-na, WU Wei-wei, et al. Stray current corrosion and protection of buried metal pipelines[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2013(2): 94-98.
- [35] 谭铮辉, 朱志平, 裴锋, 等. 直流杂散电流对不同含水率土壤中接地网材料腐蚀特性的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013(3): 37-42.
TAN Zheng-hui, ZHU Zhi-ping, PEI Feng, et al. Influence of DC stray current on corrosion behavior of grounding grid materials in soils with different moisture content [J]. Corrosion science and protection technology, 2013(3): 37-42.
- [36] XU S Y, LI W, XING F F, et al. Novel predictive model for metallic structure corrosion status in presence of stray current in DC mass transit systems[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(3): 956-962.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] MCINTOSH D H. Grounding where corrosion protection is required[J]. IEEE transactions on industry applications, 1982, 18(6): 600-607.
- [40] LALVANI S B, ZHANG G. The corrosion of carbon steel in a chloride environment due to periodic voltage modulation: Part I[J]. Corrosion science, 1995, 37(10): 1567-1582.
- [41] LALVANI S B, ZHANG G. The corrosion of carbon steel in a chloride environment due to periodic voltage modulation: Part II[J]. Corrosion science, 1995, 37(10): 1583-1598.
- [42] SONG H-S, KHO Y-T, KIM Y-G, et al. Competition of AC and DC current in AC corrosion under cathodic protection[C]//Proceedings of the corrosion 2002. California: NACE, 2002.
- [43] 朱敏, 杜翠薇, 李晓刚, 等. 交流电频率对 X80 管线钢在酸性土壤模拟溶液中腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(3): 225-230.
ZHU Min, DU Cui-wei, LI Xiao-gang, et al. Effects of alternating current (AC) frequency on corrosion behavior of X80 pipeline steel in a simulated acid soil solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2014, 34(3): 225-230.
- [44] 姜子涛, 杜艳霞, 董亮, 等. 交流电对 Q235 钢腐蚀电位的影响规律研究[J]. 金属学报, 2011(8): 30-35.
JIANG Zi-tao, DU Yan-xia, DONG Liang, et al. Effect of AC current on corrosion potential of Q235 steel[J]. Acta metallurgica sinica, 2011(8): 30-35.
- [45] QIN Q, WEI B, BAI Y, et al. Effect of alternating current frequency on corrosion behavior of X80 pipeline steel in soil extract solution of Dagang[J]. International journal of pressure vessels and piping, 2020, 179: 104016.
- [46] FERNANDES S Z, MEHENDALE S G, VENKATACHALAM S. Influence of frequency of alternating current on the electrochemical dissolution of mild steel and nickel [J]. Journal of applied electrochemistry, 1980, 10(5): 649-654.
- [47] WAKELIN R G, GUMMOW R A, SEGALL S M. AC Corrosion-case histories, test procedures, mitigation[C]//Proceedings of the corrosion 1998. Houston: NACE, 1998.
- [48] GUO Y, MENG T, WANG D, et al. Experimental research on the corrosion of X series pipeline steels under alternating current interference[J]. Engineering failure analysis, 2017, 78: 87-98.
- [49] HOSOKAWA Y. Overcoming the new threat to pipeline integrity-AC corrosion assessment and its mitigation[C]//Proceedings of the corrosion 2008. Houston: NACE, 2008.
- [50] XU L Y, SU X, CHENG Y F. Effect of alternating current on cathodic protection on pipelines[J]. Corrosion science, 2013, 66: 263-268.
- [51] FU A Q, CHENG Y F. Effect of alternating current on corrosion and effectiveness of cathodic protection of pipelines[J]. Canadian metallurgical quarterly, 2013, 51(1): 80-90.
- [52] NACE. Alternating current corrosion on cathodically protected pipelines: Risk assessment, mitigation, and monitoring[M]. Phoenix: NACE, 2018.
- [53] 梁毅, 杜艳霞. 交流干扰和阴极保护协同作用下的腐蚀评判标准与机理研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(3): 216-222.
LIANG Yi, DU Yan-xia. Research progress on evaluation criteria and mechanism of corrosion under cathodic protection and AC interference[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2020, 40(3): 216-222.
- [54] WAN H, SONG D, LIU Z, et al. Effect of alternating current on stress corrosion cracking behavior and mechanism of X80 pipeline steel in near-neutral solution[J]. Journal of natural gas science engineering, 2017, 38: 458-465.
- [55] ZHU M, DU C, LI X, et al. Effect of AC current density on stress corrosion cracking behavior of X80 pipeline steel in high pH carbonate/bicarbonate solution[J]. Electrochimica acta, 2014, 117(20): 351-359.
- [56] 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 in acid soil environment [J]. Journal of materials engineering, 2015, 43(2): 85-90.
- [57] CHIN D T. Corrosion by alternating current: polarization of mild steel in neutral electrolytes[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1983, 130(8): 1714.
- [58] 郭敏, 杨琴. 交流电波形对低压腐蚀铝箔微观形貌及性能的影响[J]. 电子元件与材料, 2013, 32(2): 33-35.
GUO Min, YANG Qin. Effects of AC etching waveforms on micro-photography and properties of the low-voltage

- etched aluminum foil[J]. *Electronic components and materials*, 2013, 32(2): 33-35.
- [59] TANG K. Corrosion of discontinuous reinforcement in concrete subject to railway stray alternating current[J]. *Cement and concrete composites*, 2020, 109: 103552.
- [60] KUANG D, CHENG Y F. Understand the AC induced pitting corrosion on pipelines in both high pH and neutral pH carbonate/bicarbonate solutions[J]. *Corrosion science*, 2014, 85: 304-310.
- [61] BRICHAU F, DECONINCK J, DRIESENS T. Modeling of underground cathodic protection stray currents[J]. *Corrosion*, 1996, 52(6): 480-488.
- [62] 李明哲. 钢制埋地管道阴极保护埋片法检测研究[J]. *广州化工*, 2014, 42(8): 104-106.
- LI Ming-zhe. Research on detection of cathodic protection for steel buried pipeline by coupon technology[J]. *Guangzhou chemical industry*, 2014, 42(8): 104-106.
- [63] 谭建红, 张胜涛, 曹阿林, 等. 土壤环境中钢的杂散电流腐蚀研究[J]. *材料导报*, 2011(4): 111-114.
- TAN Jian-hong, ZHANG Sheng-tao, CAO A-lin, et al. Stray current corrosion behavior of steel in soil environments[J]. *Materials review*, 2011(4): 111-114.
- [64] 万红霞. 交流电作用下 X80 钢近中性 pH 环境应力腐蚀行为及机理[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- WAN Hong-xia. Stress corrosion cracking behavior and mechanism of X80 pipeline steel under alternating current application in near-neutral pH solution[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [65] 李自力, 杨燕. 金属管道交流腐蚀研究新进展[J]. *石油学报*, 2012, 33(1): 164-171.
- LI Zi-li, YANG Yan. New progress in studying alternating current corrosion on metal pipelines[J]. *Acta petrolei sinica*, 2012, 33(1): 164-171.
- [66] MCCOLLUM B, AHLBORN G H. The influence of frequency of alternating or infrequently reversed current on electrolytic corrosion[J]. *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, 1916, 182(1): 301-345.
- [67] GOIDANICH S, LAZZARI L, ORMELLESE M. AC corrosion-Part 1: Effects on overpotentials of anodic and cathodic processes[J]. *Corrosion science*, 2010, 52(2): 491-497.
- [68] WILLIAMS J F. Corrosion of metals under the influence of alternating current[J]. *Matterport*, 1966, 5(2): 52-53.
- [69] BRUCKNER W. Soil corrosion of steel by alternating currents[C]//*Proceedings of the process 19th annually conference national association of corrosion engineers*. Houston: NACE, 1963.
- [70] LALVANI S B, LIN X A. A theoretical approach for predicting AC-induced corrosion[J]. *Corrosion science*, 1994, 36(6): 1039-1046.
- [71] LALVANI S B, LIN X. A revised model for predicting corrosion of materials induced by alternating voltages[J]. *Corrosion science*, 1996, 38(10): 1709-1719.
- [72] BERTOCCI U. AC Induced Corrosion. The effect of an alternating voltage on electrodes under charge-transfer control[J]. *Corrosion*, 1979, 35(5): 211-215.
- [73] BOSCH R W, BOGAERTS W F. A theoretical study of AC-induced corrosion considering diffusion phenomena[J]. *Corrosion science*, 1998, 40(2-3): 323-336.
- [74] XU J, BAI Y, WU T, et al. Effect of elastic stress and alternating current on corrosion of X80 pipeline steel in simulated soil solution[J]. *Engineering failure analysis*, 2019, 100: 192-205.
- [75] XU L, SU X, YIN Z X, et al. Development of a real-time AC/DC data acquisition technique for studies of AC corrosion of pipelines[J]. *Corrosion science*, 2012, 61: 215-223.
- [76] QING Y, BAI Y, XU J, et al. Effect of alternating current and sulfate-reducing bacteria on corrosion of X80 pipeline steel in soil-extract solution[J]. *Materials*, 2019, 12(1): 144-159.
- [77] TANG K. Stray alternating current (AC) induced corrosion of steel fibre reinforced concrete[J]. *Corrosion science*, 2019, 152(15): 153-171.
- [78] ALLEN J, BARD-LARRY R. *Electrochemical methods: Fundamentals and applications*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [79] 孙云峰, 李毅, 王中良, 等. 油气管道直流杂散电流腐蚀防护研究进展[J]. *管道技术与设备*, 2015, 136(6): 46-48, 51.
- SUN Yun-feng, LI Yi, WANG Zhong-liang, et al. Development of DC stray-current corrosion protection study on oil and gas pipeline[J]. *Pipeline technique and equipment*, 2015, 136(6): 46-48, 51.
- [80] 杨帆. 杂散电流对燃气管道的干扰腐蚀调查与防护技术分析[J]. *河南建材*, 2019(6): 18-19.
- YANG Fan. Investigation and technical analysis of interference corrosion of gas pipeline by stray current[J]. *Henan building materials*, 2019(6): 18-19.
- [81] 国内首套高压直流干扰大功率直流排流器研制成功[J]. *石油化工应用*, 2018, 37(11): 24.
- The first set of high-voltage DC interference dc drainer has been developed successfully in China[J]. *Petrochemical industry application*, 2018, 37(11): 24.
- [82] 陈冠举, 唐德志, 杜艳霞, 等. 埋地金属管道地铁动态直流干扰防护现场对比分析[J]. *材料保护*, 2018, 51(9): 135-140, 148.
- CHEN Guan-ju, TANG De-zhi, DU Yan-xia, et al. Comparative analysis of dynamic direct current interference mitigation methods for buried metallic pipeline[J]. *Materials protection*, 2018, 51(9): 135-140, 148.
- [83] 孔琦. 管道杂散电流智能排流装置的研究与设计[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2009.
- KONG Qi. Research and design of intelligent pipe Stray current discharge device[D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2009.
- [84] 滕延平, 张永盛, 王禹钦, 等. 杂散电流排流设施有效性评价研究[J]. *管道技术与设备*, 2012(4): 44-46, 58.
- TENG Yan-ping, ZHANG Yong-sheng, WANG Yu-qin, et al. Research on the evaluation of stray current drainage method[J]. *Pipeline technique and equipment*, 2012(4): 44-46, 58.