

文章编号:2095-0411(2016)01-0067-06

埋地管道交流腐蚀与阴极保护研究进展

康甜甜,刘 波,王树立,刘朝阳,姜英豪,周 昊,杨 燕
(江苏省油气储运技术重点实验室(常州大学),江苏 常州 213016)

摘要:随着各类埋地金属管道和电力设施建设规模不断扩大,交叉或平行而建的情况越来越多,管道周围的电磁环境十分复杂,使埋地管道受交流腐蚀的严重威胁。研究分析了交流干扰腐蚀机理、分类及其对埋地金属管道的干扰腐蚀危害,介绍了国际上交流干扰测试方法和实验研究进展,阐述了埋地金属管道在交流干扰影响下阴极保护标准的评价准则,将交流干扰腐蚀防护措施总结为“防”、“堵”、“排”3类,并对这一领域研究前景及发展方向做了展望。

关键词:交流腐蚀;腐蚀机理;阴极保护准则;实验研究;防护措施

中图分类号: TG 174

文献标志码: A

doi: 10. 3969/j. issn. 2095-0411. 2016. 01. 013

Research Progress of AC Interference Corrosion and Cathodic Protection of Buried Pipelines

KANG Tiantian, LIU Bo, WANG Shuli, LIU Chaoyang, JIANG Yinghao, ZHOU Hao, YANG Yan
(Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: With the increasing development of buried pipelines and the rail transit systems, the situations of these facilities being built in cross and parallel are more likely to emerge, therefore, the electromagnetic environment around the buried pipelines is so complex that there are AC corrosion problems arisen by it. The mechanism, classification on AC interference corrosion and the damage on the buried pipelines are introduced; the advanced monitoring methods and the experimental research progress for AC interference corrosion are given; the criteria of cathodic protection in the presence of AC interference corrosion is also stated. In the end, the protection methods for AC interference corrosion are summarized in three categories, for defence, blockage and drainage and the developing prospects of the research in this field are explored.

Key words: AC corrosion; mechanism; criteria of cathodic protection; experimental research; protection

随着对能源需求的不断增加,高速便捷出行要求的日益提高,世界各国加速了能源的运输渠道管道和电力设施的建设,“十二五”规划时提出、计划于2015年全面贯通的世界最大铁路网——“四纵四

横”,其总里程数将达到1.2万km以上,可以说这是世界铁路发展史上的一座里程碑。截止到2012年底,中国高铁客运专线达到9 356 km,居世界第1位。截止到目前,我国电气化铁路已接近3万km,

收稿日期: 2015-03-06。

基金项目: 江苏省自然科学基金资助(BY20140371-33)。

作者简介: 康甜甜(1990—),女,山东聊城人,硕士生。通讯联系人:王树立(1957—),wsl@cczu.edu.cn

位居世界第 2 位。然而由于受到空间、地理环境等的限制,埋地管道常常不可避免地要与高压交流输电线等交流电力设施并行而建使得越来越多的埋地管道因受到交流电力设施的干扰而存在发生交流腐蚀的风险。据原东北输油管理局的统计,东北地区共有输油管线 2 000 km,由于电气化铁路等设施的大规模建设,受到杂散电流干扰影响的管道日益增多,调查显示,有 80% 的管道腐蚀穿孔事故是由杂散电流引起的,腐蚀速度大于 10~12mm/a。实验研究发现,交流电气化铁路与管段平行距离越短,交叉角度越小,管段所受的交流干扰越强^[1]。

早先的研究表明,交流的腐蚀效率低,由交流造成的腐蚀量还不到由等量直流造成的腐蚀量的 1%^[2],而且埋地金属管道的阴极保护电流能迅速地抑制交流引起的腐蚀,因此,研究人员们并不重视埋地管道交流腐蚀的问题。但近 20 年,在美国、德国和加拿大等地发生多起由交流腐蚀造成的燃气和石油管道泄漏的案例,其中,Priz 对德国境内的一条煤气管道的多年研究得出交流干扰引起的试片孔蚀速率达 210mm/a;1993 年,在法国进行的防腐层破损调查中,具有良好阴极保护水平(通电电位超过了一 2.0V (CSE) 的聚乙烯防腐输气管线(平行于一条 400kV 高压输电线路)上发现了 31 起交流腐蚀案例。埋地管道的交流腐蚀问题日益突出,成为当前腐蚀研究领域的热点。近期研究发现,在交流干扰存在时,随着各参数的变化,阴极保护效果会受到不同程度的影响,“传统的”-0.85V (CSE) 阴极保护标准已经不再适用^[3]。

1 交流腐蚀的机理

来自于交流电气化铁路和高压输变电系统的交流杂散电流通过容性、阻性及感性耦合对相邻近的埋地管道或金属结构体造成电流干扰,使管道中产生流进、流出的交流杂散电流而导致腐蚀,称为交流腐蚀。造成交流干扰的因素有很多,静电场感应产生的容性耦合干扰,输电线路故障接地及电气化铁路回流时部分电流流入大地造成的阻性耦合干扰,输电线路强电流产生交变磁场对与之平行的管道造成的感性耦合干扰等。不过对于埋地油气管道来说,大部分的交流干扰来源于阻性耦合干扰。

交流腐蚀机理可表述为:电极电位较低的金属失去电子被氧化而变成金属离子,同时金属周围介质中电极电位较高的金属离子或非金属离子得到电子而被还原,从而致使失去电子的金属腐蚀。但是

由于交流腐蚀过程很短,而且交流电可以改变方向,所以交流腐蚀与直流腐蚀以及其他腐蚀有很大的不同,实际的作用机理也非常复杂。

1.1 法拉第整流效应

法拉第整流效应是指对处于自然状态下的金属电极上施加正弦的交流时,电极会周期性的阳极或阴极极化,由于电极的 $E-I$ 曲线的非对称性,阳极极化所产生的总电流和阴极极化所产生的总电流并不相等,从而产生净的法拉第电流。若该电流是阳极电流,那么就会直接加速金属的腐蚀;若该电流是阴极电流,那么就会保护金属不受腐蚀,同时对附近的金属结构物造成间接的腐蚀。因此法拉第电流成为研究交流腐蚀机理的一个重要内容。近期研究发现,在交流电流的阳极半周发生的电化学过程在阴极半周并不完全可逆,从而会导致双电层及金属表面电化学成分发生改变,因此,建立在电化学过程可逆基础上的法拉第整流效应就不足以解释交流电流对腐蚀的影响。

1.2 交流电压在金属/介质界面的振荡作用

NIELSEN 等根据大量的现场试验和案例调查分析,认为埋地管道涂层破损处局部环境碱性化和交流电压在金属/介质界面的振荡作用诱发埋地管道发生交流腐蚀^[4]。阴极保护下埋地管道表面的阴极反应会产生大量的 OH^- ,从而使涂层缺陷处局部环境的 pH 升高,在较高的 pH 下,交流电压的循环振荡破坏了金属表面的氧化膜,从而促使交流腐蚀发生^[5]。

PANOSIAN^[6]等研究了不同 pH 下金属的交流腐蚀行为,认为交流腐蚀发生的根源是交流电压在金属/介质界面的振荡作用,即金属在活化区和免蚀区,或钝化区和免蚀区之间的往复交替变化。在酸性、中性和微碱性介质中,交流腐蚀的发生是由于 Fe 的腐蚀反应不可逆;在碱性介质($\text{pH} < 14$)中,腐蚀的发生是由于无法形成钝化膜导致的;在超碱性介质($\text{pH} > 14$)中,交流电压的振荡作用促使金属表面薄氧化膜的形成和还原,从而可能导致金属的初期腐蚀。

1.3 阳极反应的去极化作用

JONES^[7]研究分析了交流电流下低合金钢和碳钢在 0.1mol/L NaCl 溶液中的腐蚀状况,发现阳极 Tafel 斜率降低,因而认为交流电流在除氧环境

下使腐蚀速率增加的主要原因是阳极反应的去极化作用,交流电流对阳极反应的去极化作用是在交流负半周内通过阴离子的脱附和表面膜的还原来实现的,在有氧环境下交流电流对阳极反应的去极化作用也很明显,但受溶解氧的限制,腐蚀速率没有太大变化。然而,Hamlin通过实验研究,认为在阴保条件下交流电对碳钢的极化或去极化作用没有显著的影响^[8]。

2 交流干扰下阴极保护评价准则的研究

2.1 管地电位阴极保护标准

欧洲管线腐蚀与保护委员会(CEOCOR)颁布的行业标准中规定:当瞬时管道对地电位 $U_{IR-free} < -850\text{mV(CSE)}$ 或更负,在硫酸盐还原细菌存在的厌氧环境中 $U_{IR-free} < -950\text{mV(CSE)}$ 或更负时,交流腐蚀风险都将大大较低。然而,许多交流干扰存在的腐蚀案例表明,当 $U_{IR-free} < -1000\text{mV(CSE)}$ 更正时,会有交流腐蚀发生的风险,特别是 $U_{IR-free}$ 正于 -850mV 的地方,交流腐蚀发生的风险更大;相反,当 $U_{IR-free}$ 值比 -1200mV(CSE) 更负时,一般不会发生腐蚀。

此外,Philippe 提出,交流干扰下的阴极保护准则的制定与管道附近的 pH 有很大的相关性。通过大量实验发现,当 pH 为 14 时,免蚀电位为 -1200mV(CSE) ;当 pH 为 10 时,免蚀电位为 -950mV(CSE) 。作者认为一般管道附近的 pH 不会超过 14,据此提出了交流干扰下阴极保护准则:管道最正的极化电位应比 -1150mV(CSE) 更负。

2.2 交直流电流密度之比阴极保护标准

英国标准 DD CEN/TS 15280—2006 中给出了使用交直流电流密度比判断交流干扰的标准: $I_{ac}/I_{dc} < 5$,交流腐蚀可能性低; I_{ac}/I_{dc} 介于 $5 \sim 10$,交流腐蚀可能性存在,需要结合极化特性、防腐层缺陷面积、土壤电阻率等与阴保相关的评判参数作进一步的调查; $I_{ac}/I_{dc} > 10$,交流腐蚀可能性很高,需要采取缓解措施。HOSOKASA 等用 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的试片研究了阴极保护对两条埋地管道的保护效率,同时用去耦装置和 Mg 阳极作为接地电极,研究了交流排流的效率,指出了直流电流密度和交流电流密度范围^[9]。

要使埋地管道免受交流腐蚀,其直流电流密度和交流电流密度必须满足以下条件^[10]:

$$(I) 0.1\text{A/m}^2 \leq I_{dc} < 1.0\text{A/m}^2, I_{ac} < 25I_{dc}$$

$$(II) 1.0\text{A/m}^2 \leq I_{dc} < 20\text{A/m}^2, I_{ac} < 70\text{A/m}^2$$

国外基于实验室研究和现场失效案例分析,建立了一套以电流密度为评判指标的交流干扰评价体系,其中欧洲标准 CEN/TS 15280:2006 提出如下评价准则(为交流电流密度, J_{DC} 为保护电流密度):当 $J_{AC} < 30\text{A/m}^2$,管道可免于交流腐蚀;当 $J_{AC} > 100\text{A/m}^2$,管道将发生交流腐蚀^[11]。

ORMELLESE 等提出当交直流电流密度之比 $I_{ac}/I_{dc} < 20$ 时,阴保电位在 $-1.0 \sim -1.15\text{V(CSE)}$ 之间,发生交流腐蚀的风险很小。FU 等研究了随着交流电流密度的变化,交流干扰下管线钢在强碱性土壤中的阴极保护判据,得出当交流电流密度小于 20A/m^2 时, -950mV 的阴保电位就能够有效地保护管道免受交流腐蚀;当交流电流密度大于 20A/m^2 而小于 500A/m^2 时,可以通过降低阴保电位来减缓交流干扰。但是,阴保电位也不能无限制的降低,否则管道“过保护”会出现氢脆现象。国内有学者从交直流电流密度关系的角度研究阴极保护的判据,研究指出,当 $I_{ac} < 10\text{A/m}^2$ 时,管道阴保电位达到 -850mV(CSE) ,可以忽略交流干扰;当 $10\text{A/m}^2 \leq I_{ac} < 50\text{A/m}^2$ 且 $I_{dc} > (I_{ac} - 10)/100$ 时,阴极保护处于有效状态;当 $I_{ac} > 50\text{A/m}^2$, $I_{dc} < 0.4\text{A/m}^2$ 管道存在交流腐蚀风险,调节 $I_{dc} > (I_{ac} - 10)/100$,管道受到交流腐蚀的风险降低,但可能产生“过保护”的风险^[12]。

2.3 极化偏移阴极保护标准

胡士信^[13] 提出当交流电流密度低于 20A/m^2 时,极化偏移 100mV 能使暴露在土壤中的金属试样得到保护,并给出了交流电流密度—阴极保护极化偏移量—控制状态(规格统一的试样)三者的关系:当阴极极化偏移量小于 100mV 时,无论交流干扰电流密度多大,试样都无法受到保护;当阴极极化偏移量大于 100mV ,而交流干扰电流密度小于 60A/m^2 时,试样受到保护。但该关系只是基于少量的实验得出的结果,还不能成为决定性的规则。将测试片浸入到模拟地下水溶液中,并暴露在间歇性的交流干扰和阴极保护下, 100mV 的阴极极化就能使其得到足够的保护。而 YUNOVICH 等指出 150mV 的阴极极化能够使管道得到足够的保护。

3 交流腐蚀实验研究

3.1 国内外研究背景及现状

国外从铁路电气化后(美国 1888 年),便开始了电气化铁路对管道直流干扰的研究,到现在已有上百年的历史,对交流干扰的研究国外也已有九十多年的历史,相比之下,国内虽起步较晚,但也已有 20 多年的历史。1907 年, HAYDEN 通过对铅电极在土壤中的测试表明:小的交流电流的腐蚀影响只相当于相同直流电流的腐蚀影响的 0.5%。美国煤气工程师协会腐蚀委员会在 1955 年的调查结果表明:27 个煤气公司的管道上存在交流干扰,其中有 7 家公司认为他们的管线上已经出现了交流腐蚀的情况。MARSH S.最早做了将铂、金、镍在硫酸和氢氧化钡溶液中,频率为 25~80Hz 时的交流电解研究,结果表明:交流电的频率不同,对金属产生的腐蚀也会有不同的影响,并且得出了频率为 60Hz 时交流电对金、铂、镍的影响是最严重的。MILLER L. S. K. W. 讨论了在地下安装的铅壳单导体电缆因感应交流壳层电流和电压而引起的交流腐蚀的降低方法,并暗示壳层的 10V 交流电压能与阳极电压大约 0.5V 的直流产生的电解相平衡。BELLASSAIL 对在沼泽地中已经受到腐蚀的带有防腐涂层的天然气管线做了交流电压的测量,在电流为 60Hz 时,管压为 8.5V,土壤电阻率是 $76\Omega \cdot m$ 最后得出结论:腐蚀是集中电池作用的结果。

对阴极保护下的管道仍然受交流干扰腐蚀的研究最早可追溯到 20 世纪 60 年代,当时的一系列实验研究已经表明交流电流会引起有阴极保护的钢板的腐蚀。关于交流干扰引起腐蚀的大多数研究工作始于德国,然而我国在这方面工作的研究起步较晚。

1972 年四川石油管理局在成都—德阳输气管道上测得交流干扰电压为 12V,第 2 年又进一步进行了现场测试,确认了交流干扰的危害,从此开始了交流干扰的研究。1980 年,东北输油管理局对盖州段输油管道的交流干扰研究表明:因变电站的接地极距管道只有 50~400m,使管道上某些管段产生的交流干扰电压高达 72V。后来,东北输油管理局在铁秦线采用钳位式排流,将管道上 57V 的干扰电压降到 9.1V,使管道的交流干扰问题得到了缓解;1985 年,为解决京秦电气化铁路对秦京输油管道的交流干扰问题,管道局与铁道部合作进行了专项研究,并采取了排流和使用高抗干扰性能的恒电位仪

等防护措施,取得了很好的成果;20 世纪 90 年代初,东北输油管理局在铁大线和鞍大线管道上同样也采用钳位式排流等措施,使管道上干扰电压的最大值从 48.1V 降至 7.3V,取得了较好的效果。此后,我国有关部门及科研院校的研究人员深入开展交流干扰和防护技术的研究,在工业应用和学术上都取得了显著成果。

3.2 交流腐蚀实验研究

杜艳霞^[14]等通过对埋地管道上不同大小的防腐层漏点在交流干扰下的模拟实验发现,交流电流作用于两个不同的防腐层漏点时,会诱导两漏点之间的直流电流流向,因此会加速面积较小的漏电处的腐蚀速率。由此可见,埋地管道上的防腐层漏点面积的不同也是加速交流腐蚀的一个重要因素。

付安庆^[15]等通过研究管线钢在两种碳酸盐溶液中的交流杂散电流腐蚀行为,得出了:当交流杂散电流密度为 $0\sim 20A/m^2$ 时,发生均匀腐蚀且速率较小;当交流杂散电流密度为 $20\sim 100A/m^2$ (浓碳酸盐溶液)或 $20\sim 200A/m^2$ (稀碳酸盐溶液)时,发生均匀腐蚀且速率增大;当交流杂散电流密度为 $200\sim 500A/m^2$ (浓碳酸盐溶液)或大于 $500A/m^2$ (稀碳酸盐溶液)时,发生局部点蚀。

黄健芳^[16]等做了关于交流腐蚀速率的实验研究,实验表明,土壤电阻率、涂层电阻率和通段时间比对交流杂散电流密度具有较为显著的影响,从而影响交流腐蚀速率。交流杂散电流密度与土壤电阻率成反比,随土壤电阻率的增大而减小,但当土壤电阻率增大到一定程度,试片上交流杂散电流密度的变化逐渐减缓;涂层电阻率与交流杂散电流密度成反比例关系,随着涂层电阻率的增大,试片上的交流杂散电流密度减小;随着通断时间比的增加,试片上交流杂散电流密度逐渐减小。阴极保护电位为 $-850mV$,施加的交流杂散电流密度小于 $10mA/cm^2$ 时,试片平均腐蚀深度小于 $0.1A/m^2$,保护较为有效;施加的交流杂散电流密度大于 $10mA/cm^2$ 时,腐蚀速率急剧增大,试片未得到有效防护。而阴极保护电位为 $-1000mV$,尽管交流杂散电流密度持续增大,平均腐蚀深度依然小于 $0.1A/m^2$ 。

许立宁^[17]等通过建立埋地管道交流干扰腐蚀试验装置,研究交流电流密度对交流腐蚀行为的影响,得出当初始电流密度为时,试样的腐蚀失重是初始电流密度为试样的 20 多倍,说明加载于试样上的交流电流密度增大后,腐蚀速率可能会显著增大。

交流干扰腐蚀的严重程度,除了与初始电流密度直接相关外,还与表面腐蚀产物的沉积有关。当腐蚀产物沉积较为致密时,会使腐蚀电流下降,腐蚀速率有降低的倾向。

TRIBOLLET B.^[18]等通过实验研究各电性参数对交流腐蚀过程的影响,还提出了阴极保护电流在某些情况下会加速交流干扰对管道的腐蚀,而腐蚀产物又会起到保护管道免受交流干扰腐蚀的作用。近期有学者进行了一系列实验尝试去分析考虑电解液电阻值与双电层电容对交流腐蚀的影响^[19-20]。

4 交流干扰的防护措施

对于埋地管道,交流杂散电流的防护的基本出发点为“防”、“堵”和“排”。

“防”:避免埋地管道与高压交流输电线等交流电力设施并行布置或增大它们之间的距离能有效地消除或减弱交流干扰的强度,从而降低埋地管道的交流腐蚀风险。

GB/T 50698—2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》标准中对管道与电压等级 220kV 的交流输电系统的各种接地装置最小距离统一为 5m,对于埋地管道与电压等级为 330kV 和 500kV 的交流输电系统的各种接地装置之间的最小水平距离分别为 6.0、7.5m,还规定了管道与 110kV 及以上高压输电线路的交叉角度不宜小于^[21]。“防”就是在标准的基础上尽可能的增大交流电力设施与埋地管道的距离,不可避免的需要交叉时尽量增大交叉角度。

“堵”:阻断交流杂散电流在交流电力系统与埋地管道之间流动;阻断杂散电流在管道上的流动。“堵”的方法大概分 2 种:一是增设屏蔽,在电力设施产生强干扰电流的地方增设一些屏蔽设施,用以阻断杂散电流,降低电力设施对埋地管道的杂散电流干扰,这种防护措施在秦皇岛输氨管道上已有实践^[22];二是分段隔离,即在电气化铁路和埋地输油管道的“公共走廊”内,有较长干扰段的管道上的适当部位设置绝缘法兰,用绝缘法兰将管道分隔为短段,从而降低电力设施对管道的干扰。

“排”:排流方法用绝缘电缆将被保护管道与排流设备连接,再与杂散电流源负极(回归线)相连,从而将杂散电流引回杂散电流源的方法,该方法是一种积极有效的防护方法。排流方法大概可以分为 4 种:直流排流法、极性排流法、强制排流法、接地排流

法。这 4 种排流方法略有不同,直流排流法简单来说就是用导线把管道与电气化铁路设施变电所中的负极直接连接起来,使得杂散电流自由的从高电位流向低电位,但是有时会出现逆流现象;极性排流法是为了防止逆流现象的产生,针对直流排流法在应用上的缺陷,使得排流电流只能从管道流向铁轨,在排流中设置单向导通的二极管整流器和逆电压继电器等装置的一种排流方法,极性排流法是在实际应用中频率最高的排流方法;强制排流法就是对受杂散电流干扰的管段加强阴极保护,防逆流回路,从而促进排流的方法,但是这种方法可能会使管道过保护,同时对铁轨加重腐蚀,所以不能随意采用;接地排流法是将管道中的杂散电流排入接地极,并使其流散于大地,然后再经大地流回铁轨的一种排流方法,这种方法虽然优于前 3 种排流方法,但是它排流效果比较差,需要定期更换接地阳极。

5 结论与展望

1)对交流腐蚀的机理的研究,需要建立有效的室内交流腐蚀模拟研究,以更好地研究埋地管道的交流腐蚀行为。在施加交流电流干扰的同时施加阴极保护电位,会导致气体从钢件表面逸出,可能改变腐蚀产物的沉积状况和致密度,从而影响其腐蚀速率和形貌,在交流电流干扰下发生阳极溶解反应的表面,施加阴极保护后,可能会发生阴极反应,从而改变阳极反应过分集中而导致腐蚀加重的趋势。阴极保护对于交流电流干扰腐蚀严重程度的影响,不同的腐蚀体系,会有不同的规律。

2)在交流干扰下传统的阴极保护准则不再适用。从目前的研究看,阴保电位的选取仍然存在很大的争议,需要更多相关的模拟实验研究来验证各类阴极保护准则。

3)通过一系列模拟交流腐蚀的实验研究得知,交流腐蚀一种是涉及多种机制和电性参数的复杂现象,想要了解各电性参数对于埋地管道防腐层破损点交流腐蚀的影响,还需要大量的实验研究。

4)当前仅依靠经验和简单公式计算来设计埋地管道交流腐蚀的缓解方案,往往不能达到想要的效果,然而借助数值模拟计算的方法来优化设计交流腐蚀缓解措施,模拟现场复杂的环境及各影响参数,达到模拟与实验相结合,是未来必要的发展趋势,但是要得到一套完整的针对不同现场情况的缓解及防护方案仍需加倍努力。

参考文献:

- [1]陈绍凯. 交流电气化铁路杂散电流对埋地管道干扰规律研究[D].青岛:中国石油大学,2009.
- [2]许立宁,朱金阳,徐欣,等. 埋地金属管道交流干扰腐蚀[J]. 腐蚀与防护,2013(5):388-390.
- [3]唐德志,杜艳霞,路民旭,等. 埋地管道交流干扰与阴极保护相互作用研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013(5):351-356.
- [4]NIELSEN L V, GALSGAARD F. Sensor technology for online monitoring of AC-induced corrosion along pipelines[C]// Corrosion. Houston, Texas: NACE, 2005.
- [5]NIELSEN L V, NIELSEN K V. AC-induced corrosion in pipelines: detection, characterization and mitigation [C]// Corrosion. Houston, Texas: NACE, 2004.
- [6]PANOSIAN Z. Effect of alternating current by high power lines voltage and electric transmission systems in pipelines corrosion [C]// Corrosion. Houston, Texas: NACE, 2009.
- [7]JONES D A. Effect of alternating current on corrosion of low alloy and carbon steels [J]. Corrosion, 1978, 34 (12): 428-433.
- [8]HAMLINT A W. Some effects of alternating current on pipeline operations[J]. Mater Perform, 1986, 25 (1): 57-62
- [9]刘志军,陈大庆,金哲,等.埋地钢质管道交流腐蚀的评价准则[J]. 油气储运,2011(9):690-692.
- [10]XU L Y, SU X, YIN Z X, et al. Development of real-time AC/DC data acquisition technique for studies of AC corrosion of pipelines[J].Corrosion Science,2012,61(1): 215-233.
- [11]BSI Technical Committee GEL/603, Cathodic protection, 2006 Evaluation of AC corrosion likelihood of buried pipelines-application to cathodically protected pipelines: CEN/TS 15280[S].London:BSI,2006.
- [12]杨涛,和宏伟,关鸿鹏,等.交流干扰下新的阴极保护准则 I_{ac}/I_{dc} 的研究[J].管道技术与设备, 2012(6):42-44.
- [13]胡士信,路民旭,杜艳霞,等.管道腐蚀新观点[J]. 腐蚀与防护, 2010(6):419-424.
- [14]JIANG Z, DU Y, LU M, et al. New findings on the factors accelerating AC corrosion of buried pipeline, Corrosion Science [J]. Original Research Article Corrosion Science,2014,81:1-10
- [15]付安庆,吕乃欣,白真权,等. 交流杂散电流对长输管线钢腐蚀行为的影响[J]. 油气储运,2014(7):748-756.
- [16]黄建芳,王建华,刘强. 交流杂散电流对埋地钢质管道腐蚀危害实验[J]. 后勤工程学院学报,2014(1):47-51.
- [17]许立宁,石云光,徐欣,等. 阴极保护下交流电流对埋地管道干扰腐蚀的影响[J]. 材料保护,2014(3):48-50.
- [18]TRIBOLLET B, MEYER M. AC-induced corrosion of underground pipelines[J].Underground Pipeline Corrosion, 2014,36:35-61
- [19]XIAO H,LALVANI S B. A linear model of alternating voltage-induced corrosion[J]. Journal of Electrochemical Society, 2008(155) :C69-C74.
- [20]ZHANG R, VAIRAVANATHAN P R, LALVANI S B. Perturbation method analysis of AC-induced corrosion [J]. Corrosion Science,2008(50):1664-1671.
- [21]赵晋云,罗鹏,郑娟,等. 国内外长输油气管道安全距离的标准对比研究[J]. 石油工业技术监督,2012(6):38-42.
- [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(5): 376-380.

(责任编辑:殷丽莉)