

交流干扰下埋地管道外加电流阴极保护应用分析

郭 勇^{1,2}, 丁继峰^{1,2}, 高志贤^{1,2}, 尹 安¹, 张 波¹, 杨朝晖¹, 李向阳³

(1. 青岛钢研纳克检测防护技术有限公司, 山东 青岛 266071; 2. 钢铁研究总院, 北京 100081;

3. 中国钢研科技集团有限公司北京材料基因组工程先进创新中心, 北京 100081)

[摘 要] 为了解交流干扰下管道阴极保护系统防护交流杂散电流腐蚀的有效性,建立了埋地钢质管道杂散电流干扰的试验装置,研究了阴极保护电流对试片交流腐蚀行为的影响。随着外加直流电压的变化,利用数据记录仪监测了试片阴极保护断电电位、交流电流密度、直流电流密度等参数随时间变化情况。结果表明:在外加直流电流增大和减小的过程中,对试片造成的影响是不可逆的;增大外加直流电流,交流电流密度降低,扩散电阻增大;试验中,随着直流电流增大,阴极保护电位极化到 -1.10 V (vs CSE)后,极化电位不再负向偏移,极化过程由电化控制转为浓差极化控制。通过交直流电流密度比显示,不能仅通过增加阴极保护电流来降低交流干扰程度,需要采用交流排流方式来降低交流干扰的影响。

[关键词] 交流干扰; 阴极保护; 电流密度; 外加电流

[中图分类号] TG172 **[文献标识码]** B **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2022.0360

[文章编号] 1001-1560(2022)12-0208-05

Analysis on Application of Impressed Current Cathodic Protection for Buried Pipelines under AC Interference

GUO Yong^{1,2}, DING Ji-feng^{1,2}, GAO Zhi-xian^{1,2}, YIN An¹, ZHANG Bo¹, YANG Zhao-hui¹, LI Xiang-yang³

(1. Qingdao NCS Testing and Protection Technology Co., Ltd., Qingdao 266071, China;

2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

3. Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the effectiveness of pipeline cathodic protection system in preventing AC interference corrosion under AC interference, the testing device for stray current interference of buried steel pipelines was established, and the influence of cathodic protection current on the AC corrosion behavior of test coupons was studied. With the change of the applied DC voltage, the changes of parameters such as the cathodic protection power-off potential, the AC current density and the DC current density of the coupons over time were monitored by data recorders. Results showed that the influence of the increase and decrease of the applied DC current on the test coupons was irreversible; With the increase of applied DC current, the AC current density decreased and the diffusion resistance increased; When the DC current increased, the cathodic protection potential would no longer shift negatively after polarization to -1.10 V (vs CSE), and the polarization process was changed from electrochemical control to concentration polarization control. The ratio of AC to DC current density revealed that, the AC interference could not be reduced simply by increasing the cathodic protection current, and it was necessary to adopt the AC drain method to reduce the impact of AC interference.

Key words: AC interference; cathodic protection; current density; impressed current

0 前 言

随着经济的高速发展,高压输电线路和高速铁路在国内大范围建设,交流干扰影响随之而来,特别是对于埋地钢质管道,交流干扰会造成管道的交流腐蚀。

早期人们认为交流干扰造成的腐蚀轻微,但随着管道防腐层等级的不断提高,管道上产生的交流干扰电压增大,造成的交流腐蚀危害越来越受到了人们的重视。在没有交流干扰的情况下,埋地管道的阴极保护系统能够阻止或减缓土壤环境的腐蚀,然而交流杂散电流

[收稿日期] 2022-06-17

[通信作者] 郭 勇(1982-),高级工程师,博士,主要从事腐蚀检测与防护技术研究工作,电话:15864214045,E-mail:gy978@163.com

造成埋地钢质管道的腐蚀问题更加复杂化。据报道,欧洲、北美和我国曾发生过多起交流干扰腐蚀,虽然管道的保护电位符合传统的阴极保护准则要求,但是埋地钢质管道依然遭受交流干扰腐蚀的情况^[1]。西气东输管道某管段受到包兰电气化铁路的交流干扰,在外检测过程中,开挖检测一处防腐层破损点,发现防腐层有划伤,在管道上防腐层破损处呈现椭圆形腐蚀坑,腐蚀坑深度为 0.9 mm,在该处测得管道阴极保护电位(vs CSE)为-1.11~-1.16 V,而交流干扰电位达 23 V,因此虽然阴极保护电位满足标准要求,但管道却发生了腐蚀^[2]。杜晨阳等研究发现在常规条件下,参照传统的-850 mV(vs CSE)阴极保护标准时,在交流干扰下试样并不能得到有效保护,被保护的金属试样处于一种加速腐蚀、自然腐蚀和阻碍腐蚀的周期性状态,从而降低了阴极保护效果,使金属发生了明显的腐蚀^[3]。丁清苗等研究了 X70 钢在模拟土壤溶液中的腐蚀行为,发现在交流干扰弱时,阴极保护准则为-815 mV(vs SCE);交流干扰强时,阴极保护准则为-835 mV(vs SCE),传统的阴极保护标准的电位准则已不适用^[4]。王新华等研究发现,在没有阴极保护条件下,通过室内模拟试验构建数学模型,当交流电流密度小于 30 A/m²时,交流腐蚀很小;当交流电流密度在 30~100 A/m²时,腐蚀危害较大;当交流电流密度大于 100 A/m²时,交流腐蚀危害很大^[5]。许立宁等^[6]构建了交流腐蚀模拟试验装置,通过控制交流电流,研究交流腐蚀的规律,发现加载于试片上的交流电流密度增大后,腐蚀速率显著增大,交流干扰腐蚀的严重程度还与试片表面的腐蚀产物有关,沉积物致密时,腐蚀电流下降,腐蚀速率降低。在交流干扰下,埋地管道的阴极保护效果不能单纯地从电位准则来判定,BS EN 15280:2013^[7]和 BS ISO 18086:2015^[8]规定,应将管道上的交流电压降低至 15 V 或更小;在测量时间段内,1 cm²试样或探针上应保持交流电流密度低于 30 A/m²,如果交流电流密度大于 30 A/m²,则在 1 cm²的试样或探针上阴极保护电流密度应低于 1 A/m²,或在测量时间段之内,保持交流电流密度和直流电流密度(J_{ac}/J_{dc})之比小于 5。交流杂散电流干扰下的埋地钢质管道阴极保护效果需要多种指标的评价准则。

本工作通过模拟试验,在交流干扰条件下,在实验室模拟埋地管道及试片,通过改变外加阴极保护电流输出,即控制直流电源,监测模拟管道的试片上阴极保护参数,研究试片阴极保护效果与交流腐蚀风险之间的相互关系,研究阴极保护系统防护交流干扰的规律。

1 试验装置及方法

本试验中采用现场取土壤试样,取样地点为广东省惠州市丘陵地段,埋地管道附近土壤类型是红壤,检测土壤 pH 值为 7.0 呈中性,离子含量如表 1 所示,在实验室添加蒸馏水,稀释至饱和状态。

表 1 土壤离子含量
Table 1 Soil ion content for experimental

土壤类型	离子含量/(g·kg ⁻¹)		
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
红壤	0.062	0.220	0.016

交流调压电源选用 STG-500W 型可调电源;直流电源选用 TXN-15020 型可调电源;数据监测设备采用 uDL2 数据记录仪。试验装置如图 1,通电电路由交流干扰电路和直流阴极输出电路组成,交流电路设置电容器,直流电路设置电感,防止交流和直流电路相互干扰。电容器的型号 CD135S,额定容量是 450 V 2 200 UF,电感型号为 1764201。

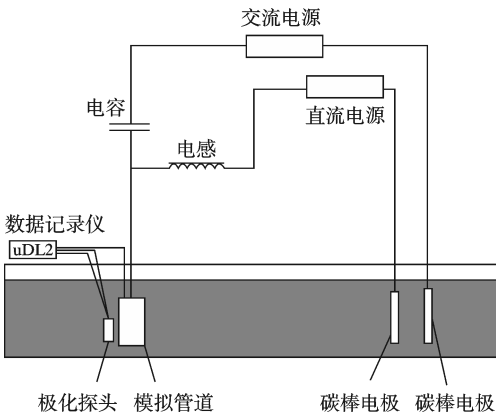


图 1 干扰试验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for interference measurements

在试验装置中,采用 20 钢试片做模拟管道,试片尺寸为 20 mm×50 mm×50 mm,试片四周与一侧表面涂覆防锈漆,另一侧裸露,裸露面积为 10 cm²,极化探头材质也为 20 钢,面积为 1 cm²,用来模拟管道缺陷,极化探头中内置一个饱和硫酸铜参比电极,辅助阳极为碳棒。交流电源用来提供频率为 50 Hz 的正弦波,本次试验固定交流电流有效值为 0.18 A。直流电源模拟阴极保护外加电流设备,模拟交流干扰 10 min 后,开始设置直流输出,输出电压为 1.0 V,每间隔 10 min 调节直流输出电压 0.5 V,调节到 5.0 V 后,稳定 10 min,开始以 0.5 V 的降幅降低直流电压输出,即直流输出电压分别为:1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,3.5,4.0,4.5,5.0,4.5,4.0,

3.5, 3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.0 V。

本文中所有没有说明的电位均是相对于饱和硫酸铜参比电极(CSE)的电位。

2 试验内容

2.1 交流干扰参数测试

在试验过程中,记录试片上的交流干扰电压、交流干扰电流密度值,每项数据的采集频率为1 s/个,记录整个试验过程的全部数据。

2.2 阴极保护参数测试

在试验过程中,记录试片上的通电电位,采集频率为1 s/个;试片断电电位采集频率为10 s/个;直流电流密度采集频率为1 s/个;记录整个试验过程的全部数据。

3 试验结果分析

3.1 试片阴极保护断电电位及直流电流密度分析

在杂散电流干扰下,埋地管道的阴极保护参数及干扰程度的检测采用试片法,图2a是断电电位随时间变化曲线,随着直流输出电压的改变,断电电位先负向偏移后再发生正向偏移,但图中断电电位不是对称式地分布,初始时,断电电位是-0.75 V,随着直流输出电压增大,断电电位迅速负向偏移,在接近-1.10 V时,虽然增大了直流电压,但试片断电电位基本保持不变,进一步极化受阻。外加直流电压增大至2.5 V和降低至2.5 V的过程中,试片的断电电位接近-1.10 V,即使外加直流电压增大至5.0 V,试片的断电电位也没有明显负移。随着输出电压继续下降,断电电位开始下降,最后断电电位维持在-0.96 V。外界输出电压虽然回到初始值,但断电电位负于初始值0.21 V,试验结果表明试片在土壤溶液中的界面形成双电层的过程并不是完全可逆的^[9]。图2b是试片直流电流密度随时间的变化情况,随着直流输出电压的改变,试片的直流电流密度随着输出电压的改变有规律地改变,但当输出电压有规律地变化时,试片直流电流密度在上升和下降过程中非对称分布,且在直流输出电压下降过程中,试片界面电流密度下降的幅度更大,且最后低于初始值,这可能和界面的结构改变有关。在阴极电流作用下,界面可能形成保护膜,增大了界面电阻,相同的直流输出电压下,电压下降过程中,试片上的电流更小,电流密度更低。

3.2 试片交流干扰电压及电流密度分析

在交流干扰电源恒流输出下,试片上的交流干扰电压和交流干扰电流密度变化情况见图3。图3a为试

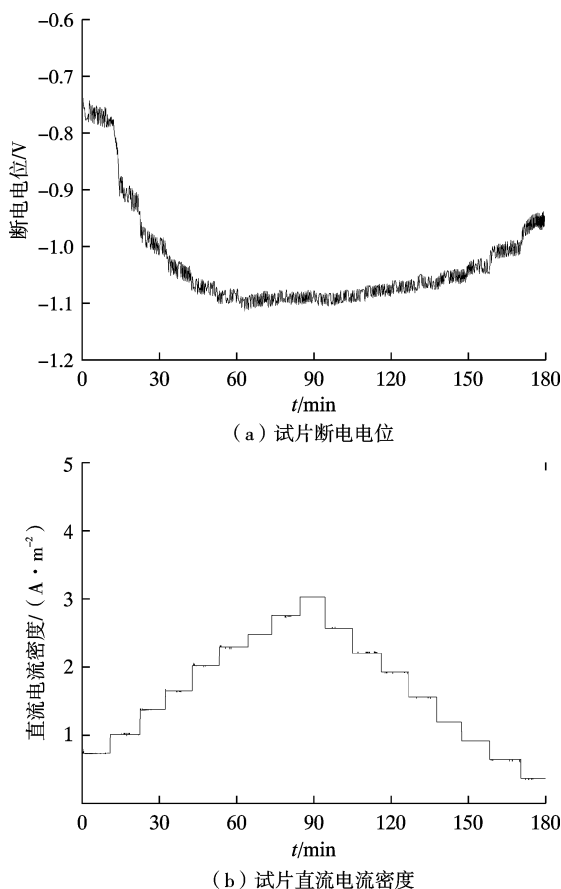


图2 试片阴极保护断电电位及直流电流密度随时间的变化情况

Fig. 2 Cathodic protection off-potential and DC current density monitoring of test coupons under various time

片交流电流密度随时间变化情况,初始时交流电流密度相对稳定,在施加直流电流后,交流电流密度不断下降。以试片的交流电压除以通过试片的交流电流密度计算试片表面的扩散电阻,反映试片表面交流电流流出的难易,见图3b。初始时,扩散电阻相对稳定,随着外加直流电压增大,扩散电阻不断上升,可能是试片表面产生了钝化膜或难溶的盐,增加了界面的阻抗,从而造成了扩散电阻的上升^[10]。

在直流电流作用下,试片的交流电流密度不断下降,交流干扰的腐蚀程度主要取决于交流电流密度^[11,12]。在野外环境中,测试的交流干扰电压值随着参比电极位置的不同变化较大,仅通过交流干扰电压判定干扰程度会造成误判^[13]。BS EN 15280-2013^[7]和BS ISO15589-1:2015^[14]中明确指出,交流电流密度只能通过试片法或探头法测试获得。本试验通过模拟安装有阴极保护系统的野外受交流干扰埋地管道,假定在野外工况下,在测试时间内埋地管道遭受的交流干扰程度不变,通过施加直流电流模拟管道上的阴极保护电流,施加恒定的交流电流模拟外部交流干扰,试

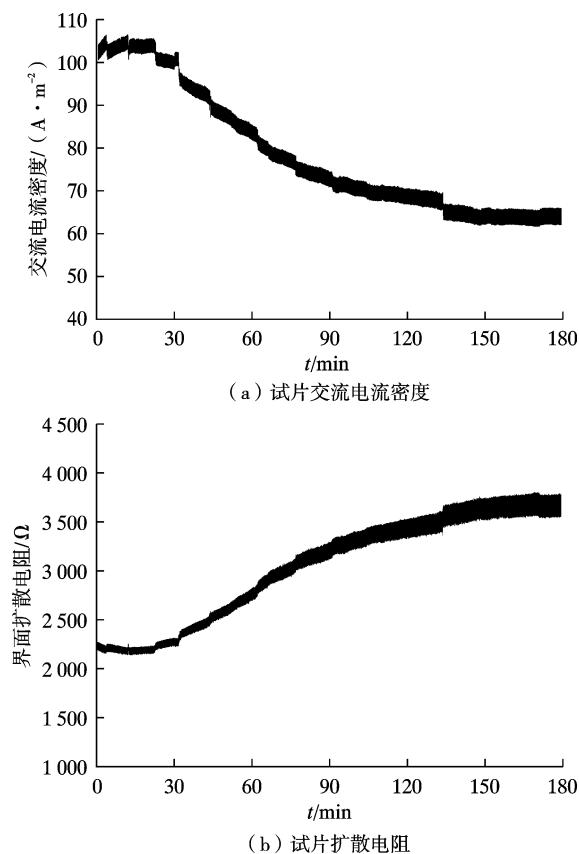


图3 试片交流电流密度及扩散电阻随时间的变化情况

Fig. 3 AC current density and diffusion resistance value monitoring of test coupons under various time

验测试装置原理与野外工况相同,试验装置能够模拟野外的干扰情况。在试验过程中,试片表面扩散电阻增大,导致交流电流减小,交流电流密度(电流与试片面积比值)降低,通过施加阴极保护电流降低了试片本身的交流干扰程度。因此,在野外环境中,通过埋地管道施加阴极保护电流能够减缓交流电流干扰腐蚀,但是据相关文献报道,阴极保护电流过大时,也可能会增大交流干扰腐蚀风险^[15]。

3.3 交直流电流密度比值分析

交流电流密度和直流电流密度的比值是国外标准中交流腐蚀的评价指标,其中英国标准 DD CEN/TS 15280-2006^[16]规定了交直流电流密度比判断交流干扰的评价指标:(1)当 $J_{ac}/J_{dc} < 5$ 时,交直流腐蚀可能性低;(2)当 J_{ac}/J_{dc} 介于 5~10 时,交流腐蚀可能性存在,需要结合极化状况、防腐层缺陷面积大小、土壤电阻率等与阴极保护相关的参数做进一步的调查;(3)当 $J_{ac}/J_{dc} > 10$ 时,发生交流腐蚀的可能性很高,需要采取缓解措施。张贵喜等^[17]研究发现,当 $J_{ac} < 10 \text{ A/m}^2$ 时,管道阴极保护电位达到 -0.85 V (vs CSE) ,可以忽略交流干扰;当 $10 \text{ A/m}^2 < J_{ac} < 50 \text{ A/m}^2$ 且 $J_{dc} > (J_{ac} - 10)/100$

时,阴极保护处于有效状态;当 $J_{ac} > 50 \text{ A/m}^2$,若 $J_{dc} < 0.4 \text{ A/m}^2$,则管道存在交流腐蚀风险,调节 $J_{dc} > (J_{ac} - 10)/100$,管道受到交流腐蚀的风险降低,但可能产生“过保护”风险。交流电流密度作为评价交流腐蚀危害的指标越来越受到重视,但是对埋地管道交流电流密度的检测存在困难。交直流电流密度比值随时间的变化见图4。由图可知,交直流电流密度比主要取决于直流电流密度,增加直流电流,交直流密度比降低;减小直流电流,交直流电流密度比增大。在试验中,交直流电流密度最小比值是 14,最大比值大于 100,随着直流电压的增大,试片阴极保护断电电位从 -0.75 V (vs CSE) 极化至接近 -1.10 V (vs CSE) ,继续增大直流电压试片阴极保护电位变化不大。即使阴极保护电流密度增大到 3 A/m^2 ,交直流电流密度之比仍大于 14,按照 DD CEN/TS 15280-2006 评价指标,发生交流腐蚀的可能性很高,但因为管道防腐层存在阴极剥离的风险,阴极保护电流不能无限制地增大,因此不能从单纯地提高阴极保护电流的角度来抑制交流杂散电流的腐蚀,需要通过降低试片上交流杂散电流的方式降低交流腐蚀的风险。

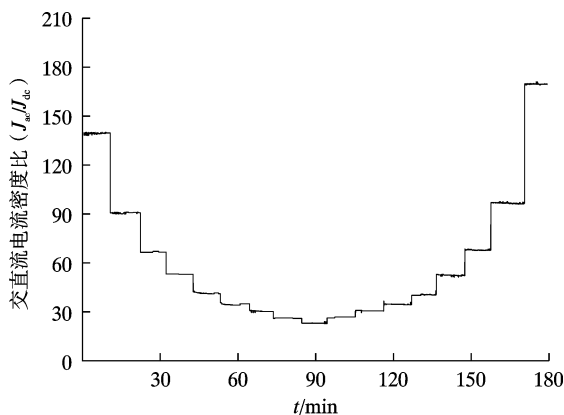


图4 试片交直流电流密度之比随时间变化情况

Fig. 4 Ratio of AC/DC current density monitoring of test coupons under various time

4 结 论

(1)在试验过程中,通过有规律地改变系统外加直流输出电压,发现试片的断电电位和直流电流密度呈非对称性变化,试片的极化过程不可逆。在直流输出电压增大的过程中,试片的断电电位极化至 -1.10 V (vs CSE) ,继续增大直流输出,试片依然保持在 -1.10 V ,在该腐蚀环境中,试片进一步极化困难,试片阴极保护电位不能无限制地负移。

(2)随着外加直流输出电压的改变,试片的交流电

流密度和扩散电阻呈现有规律的变化,交流电流密度随着时间的延长逐步减小,扩散电阻随着时间逐步增大,试片界面反应增大了界面阻抗,降低了交流电流密度。

(3)在试验过程中,试片的交直流密度比值最小达到 14,依然大于 5,按照目前的交流电流密度评价指标,交流腐蚀的风险较高,降低交流腐蚀的风险不能仅仅通过增大阴极保护电流的方式来实现,而是需要通过降低试片上交流干扰电流的方式来实现。

[参 考 文 献]

- [1] 吴荫顺,曹 备. 阴极保护和阳极保护—原理、技术及工程应用[M].北京:中国石化出版社,2007:212-213.
WU Y S, CAO B. Principle, technology and engineering application of cathodic protection and anodic protection[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007:212-213.
- [2] 茅斌辉,孙 舫,周素云. 强电线路下阴极保护管道交流干扰腐蚀评价[J]. 煤气与热力, 2016, 36(4): 1-6.
MAO B H, SUN F, ZHOU S Y. Evaluation of alternating current Interference corrosion on cathodic protection pipelines under power lines[J]. Gas & Heat, 2016, 36(4): 1-6.
- [3] 杜晨阳,曹 备,吴荫顺. 交流干扰下-850 mV(CSE)阴极保护电位准则的适用性研究[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(9): 655-659.
DU C Y, CAO B, WU Y S. Applicability of -0.85V(CSE) cathodic protection potential criterion under AC interference condition[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(9): 655-659.
- [4] 丁清苗,王 辉,吕毫龙,等. 电化学方法研究交流干扰对阴极保护电位的影响[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(12): 984-987.
DING Q M, WANG H, LU B L, et al. Electrochemical study on impact of AC on cathodic protection potential[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(12): 984-987.
- [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 X H, YANG G Y, HUANG H, et al. AC Stray current corrosion law of buried steel pipelines[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(4): 293-297.
- [6] 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, 34(5): 388-390.
XU L N, ZHU J Y, XU X, et al. AC Interference corrosion of buried metal pipelines[J]. Corrosion and Protection, 2013, 34(5): 388-390.
- [7] BS EN 15280:2013, Evaluation of A.C. corrosion likelihood of buried pipelines applicable to cathodically protected pipelines[S].
- [8] BS ISO 18086:2015, Corrosion of metals and alloys - Determination of AC corrosion - Protection criteria[S].
- [9] 李 获. 电化学原理:第3版[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008:56-63.
LI D. Principles of Electrochemistry (Third Edition)[M]. Beijing: Beijing Aerospace University Press, 2008:56-63.
- [10] 朱 敏,王亚铭,袁永锋,等. 交流干扰下不同组织 X80 钢在碱性土壤环境中的腐蚀行为[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(1): 104-112.
ZHU M, WANG Y M, YUAN Y F, et al. Corrosion behavior of X80 pipeline steel with different microstructure under AC interference in alkaline soil environment[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(1): 104-112.
- [11] 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.
- [12] TANG D Z, DU Y X, LU M X, et al. Effect of AC current on corrosion behavior of cathodically protected Q235 steel[J]. Mater Corros, 2015, 66(3): 278-285.
- [13] 唐德志,杜艳霞,路民旭. 埋地管道交流干扰有效检测技术及风险评价方法最新研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(3): 311-318.
TANG D Z, DU Y X, LU M X. Recent advances in testing and risk assessment of AC interference with buried pipelines[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(3): 311-318.
- [14] BS ISO 15589-1:2015, Petroleum, petrochemical and natural gas industries - cathodic protection of pipeline systems - part 1: On-land pipelines[S].
- [15] 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, 47(3): 48-50.
XU L N, SHI Y G, XU X, et al. Influence of AC interference current corrosion on cathodic protection buried pipelines[J]. Materials Protection, 2014, 47(3): 48-50.
- [16] DD CEN/TS 15280-2006, Evaluation of AC corrosion likelihood of buried pipelines application to cathodically protected pipelines[S].
- [17] 张贵喜,唐和清,金 鑫,等. 高压输电线路对埋地钢质管道的腐蚀影响[J]. 油气储运, 2010, 30(2): 125-132.
ZHANG G X, TANG H Q, JIN X, et al. Corrosion effect of high-voltage transmission lines on buried steel pipelines[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2010, 30(2): 125-132.

[编校:魏兆军]