

文章编号: 1000-8241(2013)04-0349-06

埋地管道杂散电流腐蚀及其数值模拟研究进展

白杨¹ 齐建涛² 李焰¹

1. 中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)化学工程学院, 山东青岛 266580

摘要: 杂散电流具有多源性特征,其腐蚀类型有直流、交流及地电流3种,其腐蚀强度大且集中于局部位置。杂散电流的成因有二:电流泄漏和电位梯度。直流杂散电流腐蚀的本质是电化学腐蚀的电解作用,而交流杂散电流的腐蚀机理有待进一步研究。目前采用的防护手段有:避开杂散电流干扰源、增大接地电阻、排流保护法、电化学方法防护、材料表面改性、加强日常维护和检修。针对杂散电流腐蚀问题的数值计算,目前主要采用有限元法和边界元法,其中边界元法应用更为广泛。当前主要通过现场电位观测法确定杂散电流腐蚀的保护方案,而通过数值计算和模型实验相结合的方式确定最佳保护方案将成为未来的发展趋势。针对土壤介质不均匀的情况,可采用分块边界元法提高计算精度。(表1,图1,参45)

关键词: 埋地管道;杂散电流腐蚀;数值模拟;模型实验;有限元法;边界元法

中图分类号: TE988

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2013.04.002

Research progress in stray current corrosion and its numerical simulation for buried pipeline

Bai Yang¹, Qi Jiantao², Li Yan¹

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, University of China Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580; 2. College of Chemical Engineering, University of China Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580

Abstract: Stray currents follow multi-source characteristics and can be divided into direct current, alternating current and ground current. They are subject to a large corrosion strength concentrated in a local position. There are two causes for stray currents, namely current leakage and potential gradient. Direct stray current corrosion is essentially electrolytic action of electrochemical corrosion, while corrosion mechanism of alternating stray current needs further studies. Current protection means adopted include avoidance of stray current interference source, increase of grounding resistance, electric drainage protection method, electrochemical protection method, material surface modification and enhancement of daily maintenance. Finite element method and boundary element method are mainly used for numerical calculations of stray current corrosion, of which the boundary element method is applied more widely. Field potential observation method is mainly used to determine a stray current corrosion protection program while it will become a future development trend to determine the optimum protection program by the combination of numerical calculations and model experiments. In the case of uneven soil media, blocked boundary element method can be used to improve calculation accuracy. (1 Table, 1 Figure, 45 References)

Key words: buried pipeline, stray current corrosion, numerical simulation, model experiment, finite element method, boundary element method

随着高压设备、城市手机基站、电气化铁路的大规模建设,地下杂散电流广泛存在并导致严重的埋地管道腐蚀问题^[1],若不及时检查维护,管道一旦发生穿孔将造成巨大的经济损失^[2-3]。据报道,德国14个城市的煤气公司地下管道因杂散电流腐蚀在几年内多次穿

孔泄漏;我国辽河油田到鞍山化肥厂的天然气管道在投产14个月后便出现杂散电流引起的腐蚀穿孔,被迫长时间停产,开挖大修。埋地管道杂散电流腐蚀受诸多因素影响,其复杂性使得实验研究和防护工作均存在很大困难。近年来,包括有限元法和边界元法在内

的数值模拟技术的迅速发展,为探讨杂散电流腐蚀规律提供了一种比较理想的研究手段^[4-5],这些数值方法可对杂散电流引起的腐蚀进行量化评价,对保障埋地管道和其他设施的安全运行具有积极意义。以下对杂散电流的腐蚀机理及现有防护措施进行介绍,并重点评述数值方法应用于埋地管道杂散电流腐蚀防护实践的相关进展,分析其发展趋势。

1 杂散电流腐蚀

杂散电流指由于某种原因离开了指定导体而在原本不应有电流的导体内流动的电流,其对金属造成的腐蚀破坏作用称为杂散电流腐蚀、干扰腐蚀或电蚀^[6],其中以阴极保护系统中的杂散电流腐蚀最为典型^[7]。在阴极保护系统中,保护电流从被保护管道的涂层缺口处流出,进入距离最近的未被保护的管道,又从该管道的远端流出并汇聚到被保护的管道,被保护管道和未被保护的附近管道的电流流出端均为阳极区,故发生杂散电流腐蚀。

1.1 类型及特点

杂散电流具有多源性特征,根据杂散电流的来源不同,其腐蚀类型可分为3种:直流、交流及地电流杂散电流腐蚀^[8]。其中,直流杂散电流腐蚀的电流来源:阴极保护系统中的阳极地床、直流电气化铁道、电解设备装置;交流杂散电流腐蚀的电流来源:高架交流电线、交流电气化铁道、高压输电线路磁耦合;地电流杂散电流腐蚀的电流来源:地磁场变化引起的大地电流、大气中离子移动产生的地空电流。

以埋地管道为例,无杂散电流时,管地电位通常为 -0.65 V 左右,直流杂散电流存在时,管地电位可达 $8\sim 9\text{ V}$,为此,杂散电流干扰对金属管道的腐蚀比一般的土壤腐蚀要强烈得多。壁厚为 $7\sim 8\text{ mm}$ 的钢管,在杂散电流的作用下, $4\sim 5$ 个月即可发生腐蚀穿孔。交流杂散电流对金属阳极有加速溶解的作用,但对管体的腐蚀危害相对较小。研究表明: 60 Hz 的交流电,其腐蚀作用仅为相同大小直流电流的 1% ^[9]。因此,在相同条件下,直流杂散电流对埋地管道的腐蚀作用更强烈^[1]。

Barlo等总结了杂散电流腐蚀的两大特点:①腐蚀强度大。无杂散电流时,自然腐蚀的驱动电位仅有几百毫伏,电流不超过几十毫安,而杂散电流干扰腐蚀的

电位可达几伏,电流最大可能上百安培。②腐蚀集中于局部位置。在管道接地电阻抗较小的部位,杂散电流易于流入土壤,腐蚀大都集中在这些位置。尤其当未保护构件表面的防腐层有破损时,接地阻抗急剧减小,局部杂散电流腐蚀加剧^[10-11]。

1.2 原因及机理

杂散电流是一个不稳定的物理量,其形成原因有二:①电流泄漏,主要由接触或绝缘不好等原因造成;②电位梯度,主要由金属结构物所处的电场本身电位分布不均匀造成^[4]。

直流杂散电流腐蚀的本质是电化学腐蚀的电解作用^[12]。对于埋地管道而言,杂散电流从土壤流入附近管道(电位相对较高)的区域,为腐蚀电池的阴极区,在管道表面发生消耗电子的阴极还原反应;杂散电流离开管道进入土壤(电位相对较低)的区域,为腐蚀电池的阳极区,在管道表面发生阳极氧化反应(表1)。

表1 杂散电流腐蚀反应^[13]

土壤环境	阴极反应	阳极反应
无氧	$2\text{ H}_2\text{O} + 2\text{ e} \rightarrow 2\text{ OH}^- + 2\text{ H}_2$	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{ e}$
无氧酸性	$2\text{ H}^+ + 2\text{ e} \rightarrow \text{H}_2$	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{ e}$
有氧碱性	$\text{O}_2 + 2\text{ H}_2\text{O} + 4\text{ e} \rightarrow 4\text{ OH}^-$	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{ e}$

交流电在土壤与金属两个导体之间流动时,因电流的方向和大小均随时间而改变,故其对金属腐蚀的影响比直流腐蚀复杂得多^[14]。国内外科研人员对此曾提出多种设想,但其腐蚀机理至今尚不清楚。曹楚南^[6]讨论了交流电流对金属阳极溶解速率的影响,根据金属阳极溶解反应的非线性E-I曲线,在交流的正半周期内,金属阳极溶解电流密度的增大量比在交流的负半周期内的减小量大得多,因而认为交流杂散电流促进了阳极溶解。Jones^[15]研究认为交流电流在除氧环境下使腐蚀速率增加的主要机制是阳极反应的去极化作用。Panossian等^[16]研究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。Kulman^[17]认为整流法拉第电流是研究交流腐蚀的重要线索。总而言之,有关交流杂散电流的腐蚀机理有待进一步研究。

1.3 防护措施

防治杂散电流腐蚀一般采用“以防为主,以排为辅,防排结合,加强监测”的综合防护原则^[13,18]。目前埋地管道杂散电流腐蚀的主要防护手段如下:

(1) 避开杂散电流干扰源。其是减少杂散电流腐蚀的最有效措施。国内外针对如何有效避开杂散电流干扰源制定了诸多标准规范。我国 SY/T 0017—2006《埋地钢制管道交流排流保护技术标准》规定:管道与 10 kV 或 35 kV 高压线排流点的距离为 2.5 m, 与 110 kV 高压线排流点的距离为 15 m, 与 220 kV 高压线排流点的距离为 30 m^[13]。

(2) 增大接地电阻。其是减少杂散电流腐蚀比较行之有效的方法^[19]。例如:通过使管道串接大电容接地或在管道与电力系统接地之间安装接地电池降低管道上的杂散电流;选择土壤环境良好的区域敷设管道也可减小杂散电流。

(3) 排流保护法。其利用电缆将被保护的管道与排流设备连接,使被保护管道变为阴极,从而防止金属管道发生阳极腐蚀^[8]。根据电气连接回路的不同,排流法可分为直接、极性、强制和接地排流,其中安装接地极进行排流可以有效缓解交流腐蚀^[20]。

(4) 电化学方法防护。由于产生杂散电流腐蚀的主要原因是电流泄漏和电位梯度,因此,可以采用牺牲阳极保护和静电屏蔽相结合的方案加以减缓^[11]。外加电流阴极保护系统中未被保护管道的杂散电流腐蚀问题,可以通过增加阳极地床的数量加以解决^[21]。

(5) 材料表面改性。目前用于防护埋地管道杂散电流腐蚀的表面改性方法包括低温气体多元共渗(如 C、N、Cr、S 等)和环氧涂层。N-C-O-S 共渗可在金属表面生成 FeS 膜, N-C-O-Cr 共渗可在金属表面生成 Cr₇C₃ 钝化膜,从而提高埋地管道等金属结构物的抗腐蚀性^[22]。环氧树脂有着良好的电绝缘性,可用于杂散电流作用下的金属结构物的防腐^[23]。

(6) 加强日常维护和检修。作为一项长期而艰巨的工作,埋地管道杂散电流防腐必须密切观测杂散电流的变化情况,如每年必须对管道防腐层进行检漏修补,定期监测管道周围是否有产生杂散电流的新建工程等。

只有系统分析导致杂散电流腐蚀的各种因素,采用科学合理的预防措施、有效的监测技术以及综合治理方法,才能解决埋地管道杂散电流的腐蚀问题。

2 数值模拟研究

随着计算机和数值计算方法的快速发展,数值模

拟技术可以准确模拟和预测杂散电流腐蚀场中电位和电流密度分布,这为杂散电流腐蚀防护研究提供了快捷、有效的手段^[17,24]。科研工作者将实验模型、电路模型的实验结果与数值模拟结果相比较,探讨了不同影响因素作用下杂散电流的腐蚀规律^[4]。

2.1 数值方法

杂散电流腐蚀的数值研究是将其简化为一个在边界和求解域内具有复杂控制方程的场论问题。对于实际工程问题而言,由于边界形状的复杂性,很难获得问题的解析解,而结合数值方法可以有效地给出工程需要的数值解^[25]。

2.1.1 概述

目前电化学腐蚀领域主要有 3 种数值计算方法:有限差分法、有限元法和边界元法^[26],各有其优缺点。

有限差分法出现最早。在微分方程中,用差商近似代替微商,将微分方程和边界条件的求解简化为求解一个线性代数方程组。其优点是编程和求解比较简单,收敛性较好;但对于非线性边界很难处理,不适用于非均匀网格。

有限元法是目前工程中应用最广泛的一种方法。其将求解域分割成小的有限个单元,再利用某种插值函数,将网格内的节点用边界上的节点表示出来,最后用节点将整个求解域联系起来。其优点是网格划分比较自由,可以得到较为满意的模拟结果。但对于求解无限域的情况,有限元法的计算范围和存储量很大,计算精度很难保证。

边界元法是近年来发展最快的一种数值方法。其通过将求解域的边界分割成若干个单元,将求解域的函数转化为求解边界上的函数值,最终简化为求解线性代数方程组。边界元法仅对边界离散,误差较小、精度高,维数的降低使得计算存储量和时间大大减少。

针对杂散电流腐蚀问题的数值计算,目前科研人员主要采用有限元法和边界元法^[27]。相对而言,边界元法应用更为广泛,其最大优点是在求解无限域问题时,能够自动满足无穷远处的边界条件,从而无需在无穷远处划分单元,弥补了有限单元法的不足。

2.1.2 计算模型

针对实际应用中的电场问题,一般的求解方法是结合边界条件求解电位函数所满足的偏微分方程,即求解边值问题^[28]。对于埋地管道的杂散电流腐蚀,由于更为关心管道表面的电位和电流密度分布,因此,大

多数研究人员倾向于采用边界元法进行数值计算,而不采用有限元法。以下对直流杂散电流腐蚀的边界元法数值模拟进行介绍。

假定研究区域(图1)内土壤介质均匀、电导率为常数,且系统状态不随时间变化,则可视为腐蚀场的稳态问题,其控制方程是拉普拉斯方程,即:

$$\nabla^2 u = 0 \quad (1)$$

管道上的电流密度符合欧姆定律:

$$i = ku \quad (2)$$

式中: i 为电流密度; k 为土壤的电导率; u 为电位。

研究区域的边界组成如下:

$$\Gamma = A_{um} + C_{pro} + C_{um} + A + S_{re} \quad (3)$$

式中: Γ 为整个腐蚀场的边界; A_{um} 为杂散电流流出未保护管道的阳极区表面; C_{pro} 和 C_{um} 为杂散电流从土壤流入保护管道及未保护管道的阴极区表面; A 为阳极地床的边界; S_{re} 为未被保护管道无缺损处绝缘涂层与土壤-空气的绝缘边界。相应的边界条件有4种。

沿着 S_{re} 绝缘边界:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

沿着 C_{pro} 和 C_{um} 阴极区域边界:

$$i_c = i_{o,c} \exp(\eta_c / \beta_c) \quad (5)$$

沿着 A_{um} 阳极区域边界:

$$i_a = i_{o,a} \exp(\eta_a / \beta_a) \quad (6)$$

沿着 A 阳极地床边界:

$$u = c \quad (7)$$

式中: n 为绝缘边界的外法线方向; η_c 和 η_a 分别为阴、阳极表面的过电位; $i_{o,c}$ 和 $i_{o,a}$ 分别为阴、阳极的交换电流密度; β_c 和 β_a 分别为阴、阳极的塔菲尔斜率; c 为常数^[29]。

其中,式(5)和式(6)分别为材料阴、阳极塔菲尔极化曲线的动力学方程式。

利用控制方程和相应的边界条件,在整个边界上加权积分,边界方程可以表示为:

$$\int_{\Gamma} i^* u d\Gamma = \int_{\Gamma} u^* i d\Gamma \quad (8)$$

其中电流密度 i 是电压 u 的空间导出量。数组 i^* 和 u^* 是几何关系的函数,叫做基本解。将边界 Γ 进行分割,上面的积分公式最终化简为如下形式:

$$[H]\{u\} = [G]\{i\} \quad (9)$$

假设发生杂散电流腐蚀的附近管道内没有电流损

失,而电位梯度可忽略,则通过图1所示研究区域附近管道的杂散电流总和应该为0^[28]。在此基础上,设定管道上存在混合电位 U_m 。

$$\sum_j I_{a,j} = \sum_j |I_{c,j}| \quad (10)$$

式中: $I_{a,j}$ 、 $I_{c,j}$ 分别为第 j 个单元上的局部阳极电流和局部阴极电流。每一个电极反应的电流密度均可由塔菲尔方程式(5)和式(6)求得,而表面的过电位与混合电位有关:

$$\eta_i = U_m - U_{o,i} \quad (11)$$

式中: $U_{o,i}$ 为每一个电极反应的平衡电位,可以通过能斯特方程近似计算:

$$U_{o,i} = U_{o,i}^0 - \frac{RT}{n_i F} \ln \frac{\Pi C_p}{\Pi C_r} \quad (12)$$

式中: $U_{o,i}^0$ 为标准条件下电极反应的电位; R 为气体常数; n_i 为每一个电极反应转移电子的数目; C_p 、 C_r 分别为产物和反应物的活度。

此外,假定每一个电极反应的反应系数一致,进一步简化计算过程。

综上可知,整个腐蚀场的电位和电流密度的分布可以通过求解线性方程组式(9)得到。可以采用两步法求解:首先获得受杂散电流腐蚀影响的附近管道的二次电流密度的分布情况;其次获得该管道上混合电位的分布情况。求解终止条件是计算结果满足设定的混合电位初始值,或是满足下述条件:

$$\left| \sum_j I_{a,j} - \sum_j |I_{c,j}| \right| < 10^{-7} \quad (13)$$

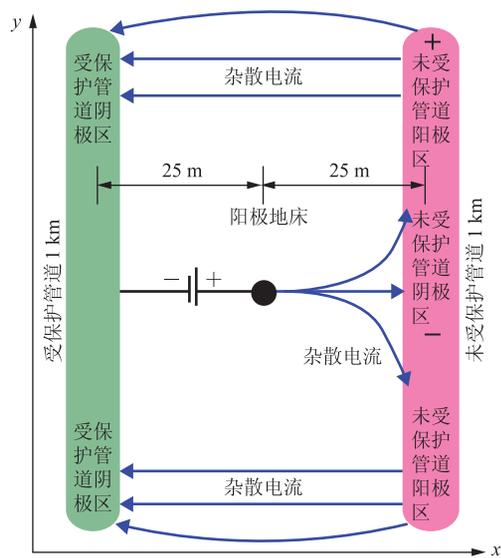


图1 阴极保护系统杂散电流腐蚀示意图^[21]

获得腐蚀场中受杂散电流腐蚀影响的附近管道表面电位和电流密度的分布结果后,可以将其作为腐蚀场的新的边界条件求解整个系统内的电位和电流密度分布,最终计算得到受杂散电流腐蚀影响的附近管道的腐蚀损失情况^[29]。

2.2 数值模拟结果

依据杂散电流腐蚀数值计算的理论基础,开发了多种数值模拟软件,其中包括有限元软件 ANSYS^[30]、CatPro&CPMaster^[31-33]及边界元软件 Beasy^[24,29,34]。

张攀峰等^[30]针对受直流杂散电流影响埋地管道的模拟研究中,利用有限元软件 ANSYS 的电磁仿真功能,对杂散电流作用下的埋地管道的电流、电位及电场进行模拟分析。采用 Electric 模块中的 Solid231 单元进行建模。在主影响管道的两侧分别施加 10 V 和 0 V 电位,土壤模型底部电位设为 0 V,考察受影响管道侧电位、电场及电流的分布情况,结果表明:主、受影响管道交角的大小对杂散电流腐蚀程度影响明显。尤其当其平行放置时,受影响管道两端部位的电场强度最大,受影响管道电流流入、流出的部位受到的电场影响最大。

Trevelyan J 等^[31]利用边界元软件 Beasy 对充满静止海水管道的电流腐蚀进行数值计算,其中电流腐蚀来自管道采用的两种不同金属材料间的电偶腐蚀。选用线性边界单元对管道离散化和加载,利用式(8)求解线性矩阵方程组,并与实验测试结果进行对比,吻合良好,而误差主要来自对实际构件杂散电流的测量。Metwally I A 等^[21]也利用 Beasy 软件对埋地管道阴极保护系统中的杂散电流腐蚀进行三维数值模拟研究,共涉及 4 种杂散电流腐蚀类型:阳极型、阴极型、耦合型和感应型,同时讨论了土壤电导率和阳极电流密度对杂散电流腐蚀的影响,发现增加阳极地床的数量可有效降低杂散电流腐蚀,且阴极型杂散电流腐蚀最为严重^[21]。

杂散电流腐蚀的数值计算精度与离散精度(离散单元数目或大小)有关,故在实际计算过程中,可以降低不重要区域的节点密度,提高较复杂或更关心区域的节点密度。此外,在多数情况下边界条件为非线性,故不同的非线性边界处理方法也会对最终结果的精度产生一定影响^[35]。

2.3 数值方法展望

针对埋地管道杂散电流腐蚀的各种影响因素,国

内外科研人员在实验室开发出相应的实验模型,如杂散电流电路元件模型^[36-39]和室内加速实验模型^[40-43]等,可为数值模拟提供更可靠的数据参考。实际工程中主要通过现场电位观测分析,确定相应的排流和保护方案。针对不同的保护方案,需要通过模型实验和数值计算相结合的方式确定最终应用方案^[44]。同时,数值计算方法不再限于单一方法的讨论,而是针对科研人员关心的区域,利用有限元和边界元进行耦合分析^[45]。此外,针对土壤介质不均匀的情况,可对介质电阻率近似相同的区域进行分区处理,采用分块边界元法进行处理,有可能提高计算精度^[28]。

3 结论

(1) 电流泄漏和电位梯度是形成杂散电流的两个主要原因。直流杂散电流腐蚀的本质是电化学腐蚀的电解作用,而交流杂散电流的腐蚀机理有待进一步研究。

(2) 针对杂散电流腐蚀问题的数值计算,目前主要采用有限元法和边界元法。相对而言,边界元法应用更为广泛,其最大优点是在求解无限域问题时,能够自动满足无穷远处的边界条件,从而无需在无穷远处划分单元,弥补了有限单元法的不足。

(3) 目前主要通过现场电位观测法确定杂散电流腐蚀的保护方案,而通过数值计算和模型实验相结合的方式确定最佳保护方案将成为未来的发展趋势;针对土壤介质不均匀的情况,可采用分块边界元法提高计算精度。

参考文献:

- [1] 高博,申龙涉,孟祥谦,等.油气管道直流杂散电流的腐蚀与防护[J].管道技术与设备,2010(4):42-43.
- [2] 韩汉青.杂散电流对地下管线的危害[C].1998年全国腐蚀电化学及测试方法学术讨论会,长沙,中国,1998:175-176.
- [3] 谭建红,张胜涛,侯保荣.土壤环境中钢的杂散电流腐蚀研究[J].材料导报,2011,25(2):107-110.
- [4] 杨清勇.杂散电流腐蚀问题基础研究[D].大连:大连理工大学,2005.
- [5] 王志宏.杂散电流及其防治[M].北京:煤炭工业出版社,1986:94-103.

- [6] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2004: 112-113.
- [7] Peabody A W. Peabody's control of pipeline corrosion[M]. Houston: NACE International, 2001: 211-236.
- [8] 唐永祥, 宋生奎, 朱坤峰. 油气管道的杂散电流腐蚀防护措施[J]. 石油化工安全技术, 2006, 22(4): 26-28.
- [9] Mc Intosh, Donald H. Grounding where corrosion protection is required[J]. IEEE Trans Industry Application, 1985, 18(6): 600-607.
- [10] Luca Bertolini, Maddalena Carsana, Pietro Pedferri. Corrosion behavior of steel in concrete in the presence of stray current[J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1 056-1 068.
- [11] Barlo T J, Zdunek A D. Stray current corrosion in electrified rail system-final report[R]. Evanston Illinois: Infrastructure Technology Institute, 1995: 1-47.
- [12] Bertolini L, Carsana M, Pedferri P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current[J]. Corrosion Science, 2007, 49(8): 1 056-1 068.
- [13] 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): 515-519.
- [14] 董亮, 路民旭, 杜艳霞, 等. 埋地管道交流腐蚀的研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2011, 31(3): 176-177.
- [15] Jones D A. Effect of alternating current on corrosion of low alloy and carbon steels[J]. Corrosion, 1978, 34(12): 428-433.
- [16] Panossian Z, Filho S E A, Almeida N L, et al. Effect of alternating current by high power lines voltage and electric transmission systems in pipelines corrosion[C]. NACE Corrosion 2009, Atlanta, USA, March 22-26, 2009: Paper No. 09541.
- [17] Kulman F E. Effects of alternating currents in causing corrosion[J]. Corrosion, 1961, 17(3): 34-35.
- [18] 郭庆茹, 何悟忠, 冷旭耀, 等. 对管道直流杂散电流干扰腐蚀的防治方法[J]. 油气储运, 2003, 22(4): 46-48.
- [19] Ian Cotton, Pete Aylott, Petra Ernst. Stray current control in DC mass transit systems[J]. Vehicular Technology, 2005, 54(2): 722-730.
- [20] 程善胜, 张力君, 杨安辉. 地铁直流杂散电流对埋地金属管道的腐蚀[J]. 煤力与热力, 2003, 23(7): 435-437.
- [21] Metwally I A, Al-Mandhari H M, Gastli A, et al. Factors affecting cathodic-protection interference[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2007, 31(6): 485-493.
- [22] 赵玉珍, 刘悦臣, 杨川. 地铁杂流对埋地管线腐蚀及抗蚀方法[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(3): 46-49.
- [23] 吴长访, 姚喆, 刘玲莉, 等. 新大管道杂散电流干扰影响研究[J]. 油气储运, 2007, 26(6): 41-44.
- [24] 邢少华, 钱建华, 王燕, 等. 轨道交通杂散电流强度对管道电位分布影响数值模拟研究[C]. 第五届全国腐蚀大会, 北京, 中国, 2009.
- [25] 吴建华, 云凤玲, 邢少华, 等. 数值模拟计算在舰艇阴极保护中的应用[J]. 装备环境工程, 2008, 5(3): 2-3.
- [26] Kim Y-G, Kim Y-C, Kho Y-T. BEM application for thin electrolyte corrosion problem[C]//Boundary Element Technology X IV. Southampton: Computational Mechanics Publications, 2001: 87-93.
- [27] 陈顺杭, 梁成浩, 袁传军. 数值方法在阴极保护中的应用及进展[J]. 全面腐蚀控制, 2006, 20(5): 19-21, 27.
- [28] 王璐. 钢板桩码头靠泊船杂散电流腐蚀研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [29] Kim Y S, Jeong G J, Sohn H J. Mathematical modeling on the corrosion of unprotected structure due to stray current resulting from cathodic protection system[J]. Metals and Materials, 1999, 5(1): 93-99.
- [30] 张攀峰, 於孝春. 受直流杂散电流影响埋地管线的 ANSYS 模拟[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(2): 146-149.
- [31] Trevelyan J, Hack H P. Analysis of stray current corrosion problems using the boundary element method[C]//Boundary Element Technology IX. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1994: 347-356.
- [32] Tosin Famakinwa, Qing Ming Chen, Satarou Yamaguchi. 3D finite element analysis of eddy current loss of HTS tapes-self field analysis[J]. Physica C: Superconductivity, 2006, 434(1): 18-23.
- [33] Fagot A, Schmitt A. Modeling stray current and its influence on corrosion of steel sheet piling[C]. Port Infrastructure Seminar, Delf, The Netherlands, June 22-23, 2010.
- [34] Strong G E, Adey R A, Rrdas K S. Computer prediction of stray current corrosion[C]. Australian Corrosion Conference, Melbourne, Australia, November, 1997.
- [35] Hack Harvey P, Janeczko Robert M. Verification of the boundary element modeling technique for cathodic protection of large ship structures[C]. Tri-Service Conference on Corrosion, Orlando, USA, 1994.

(下转第 369 页)

制宜,可以有效防止原油管道融沉,保障管道长期安全运行。

参考文献:

- [1] 吉延峻,金会军,王国尚,等.中俄原油管道(漠河—大庆段)地基土融沉稳定性评价研究[J].工程地质学报,2010,18(2): 241-251.
- [2] 金会军,喻文兵,高晓飞,等.冻土区输油管道工程基础稳定性研究[J].油气储运,2006,25(2): 13-18.
- [3] 张建明,刘永智,吴青柏,等.公路工程冻土类型划分研究[J].西安公路交通大学学报,2001(10): 1-5.
- [4] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,1998: 25-36.
- [5] Rupert G Tart.Pipeline geohazards unique to northern climates[C]. Proceedings of 6th International Pipeline Conference, Calgary, Canada, September 25-29, 2006: IPC2006-
- (上接第 354 页)
- [36] 庞原冰,李群湛.地铁杂散电流模型讨论[J].重庆工学院学报(自然科学版),2007,21(11): 110-113, 150.
- [37] 王喜娟,李浩玉,赵旭艳.油气管道焊接动火作业中杂散电流的防范[J].油气储运,2012,31(1): 36-41.
- [38] Wang Yuqiao, Li Wei, Yang Xuefeng, et al. Modeling and simulation the distribution of metro stray current[C].2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICASM2010), Taiyuan, China, October 22-24, 2010: 704-707.
- [39] Wang Chonglin, Ma Caoyuan, Liu Jianhua, et al. Study on coalface stray current safety early warning based on ANFIS[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 1 332-1 336.
- [40] 曹阿林,朱庆军,侯保荣,等.埋地金属管道杂散电流影响因素模拟研究[J].煤气与热力,2010,30(5): 7-8.
- [41] 腾海文,杨森茂,舒正昌.加载水平对杂散电流和盐溶液共同作用下钢筋锈蚀影响的模拟试验研究[J].混凝土,2010,32(7): 1-3, 7.
- [42] 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.
- [43] Chen Zhiguang, Qin Chaokui, Zhang Yangjun, et al. Design and application of a stray current monitoring system[C]. 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control

10085.

- [6] 刘鸿绪,童长江,徐教祖,等. JGJ 118-98 冻土地区建筑地基基础设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,1998: 52-77.
- [7] 梁翕章,唐智圆.世界著名管道工程[M].修订版.北京:石油工业出版社,2002: 77-94.

(收稿日期:2012-04-26;编辑:关中原)

作者简介:张鑫,助理工程师,1985年生,2010年硕士毕业于西安交通大学动力工程及工程热物理专业,现主要从事长输油气管道的节能监测工作。

电话:0316-2174247;Email: xinzhangyanzi@163.com

Zhang Xin, MS.D, assistant engineer, born in 1985, graduated from Xi'an Jiaotong University, power engineering and engineering thermo physics, in 2010, engaged in the energy-saving monitoring of long-distance oil and gas pipelines.

Tel: 0316-2174247, Email: xinzhangyanzi@163.com

and Electronic Engineering (CMCE), Changchun, China, 2010: 434-437.

- [44] Metwally I A, Al-Mandhari H M, Gastli A, et al. Stray currents of ESP well casings[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2008, 32: 32-40.

- [45] Brichau F, Deconinck J.A numerical model for cathodic protection of buried pipes[J]. Corrosion Science, 1994, 50(1): 39-49.

(收稿日期:2012-05-21;编辑:关中原)

基金项目:中央高校基本科研费用专项资金资助项目, 10CX05012A.

作者简介:白杨,在读硕士生,1990年生,2011年毕业于中国石油大学胜利学院信息与计算科学专业,现主要从事长输油气管道腐蚀防护技术研究。

电话:13615321199;Email: yanlee@upc.edu.cn

Bai Yang, reading master, born in 1990, graduated from Shengli College of China University of Petroleum, information and computing science, in 2011, engaged in the research of corrosion protection technology of long-distance oil and gas pipeline.

Tel: 13615321199, Email: yanlee@upc.edu.cn