

对 45[#]钢管道的缝隙腐蚀模拟研究

许宏良¹, 殷苏民²

(1.江苏城乡建设职业学院, 江苏 常州 213147; 2.江苏大学, 江苏 镇江 212013)

摘要: 目的 预测埋地金属管道缝隙表面电位分布和腐蚀速度。方法 造金属管道缝隙腐蚀的几何模型, 对腐蚀管道采取阴极保护, 推导腐蚀管道的电化学反应动力方程式。对几何仿真模型的初始条件及边界条件进行约束, 采用 MATLAB 软件对阴极保护电位分布规律和表面缝隙腐蚀速度的几何模型进行了仿真, 并且与实验测量结果进行对比, 得出了仿真结果与实验结果的相对误差。结果 采用阴极保护金属管道表面缝隙腐蚀的底部仿真电位随时间的增加而反向增大, 在极化时间 50 h 内最大电位为 -8.6 V。采用阴极保护金属管道表面缝隙腐蚀的仿真电位随缝隙深度的增加而反向减小, 在距离缝隙表面 10 cm 内最小值为 -0.78 V。采用阴极保护金属管道表面缝隙的仿真腐蚀速度随时间的增加而逐渐减小, 在前 5 年内腐蚀速度最小值达到 0.334 mm/a。同时, 电位分布和腐蚀速度的仿真值与实验测量值的相对误差在 5% 以内, 误差较小。结论 采用矩形缝隙模型可以近似预测阴极保护的电位分布和缝隙表面腐蚀速度, 从而降低了金属管道腐蚀速度, 避免了金属管道发生灾难性的事故。

关键词: 金属管道; 剥离涂层; 缝隙腐蚀; 阴极保护; 电位分布; 几何模型; 仿真

中图分类号: TG17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)12-0161-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.12.026

Simulation of Crevice Corrosion in 45[#] Steel Pipeline

XU Hong-liang¹, YIN Su-min²

(1.Jiangsu Urban and Rural Construction College, Changzhou 213147, China;

2.Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: The work aims to predict surface potential distribution and corrosion rate of buried metal pipeline. The geometry model of crevice corrosion of metal pipeline was constructed, and the electrochemical reaction dynamic equation of corroded pipeline was derived by providing cathodic protection. Initial conditions and boundary conditions of geometric simulation model were constrained. MATLAB software was utilized to simulate the geometric model covering potential distribution law of cathodic protection and corrosion speed of surface crevice, and the simulation results were compared with experimental measurements to obtain relative error between the simulation results and experimental results. Bottom simulation potential of surface crevice corrosion in metal pipeline under cathodic protection increased reversely with the increase of the time, and the maximum potential in 50 h of polarization time was -8.6 V. Simulation potential of surface crevice corrosion in metal pipeline under cathodic protection decreased reversely with the increase of crevice depth, and the minimum potential at a distance within 10 cm

收稿日期: 2016-05-05; 修订日期: 2016-06-06

Received: 2016-05-05; Revised: 2016-06-06

基金项目: 江苏省科技支撑计划资助项目 (BE2013009-1)

Fund: Supported by Science and Technology Support Program of Jiangsu Province (BE2013009-1)

作者简介: 许宏良 (1967—), 男, 副教授, 主要研究方向为燃气管道腐蚀、环境工程。

Biography: XU Ho-liang (1976—), Male, Associate professor, Research focus: gas pipeline corrosion and environmental engineering.

from the crevice surface was -0.78 V. The simulated corrosion rate of surface crevice in metal pipeline under cathodic protection decreased gradually with the increase of time, and the minimum corrosion rate was 0.334 mm/a in the first 5 years. Meanwhile, the relative error between simulation value and experimental measurement was less than 5%. Hence the rectangular crevice model can be used to predict potential distribution of cathodic protection and corrosion rate of crevice surface, further reducing the corrosion rate of metal pipeline and preventing catastrophic accidents.

KEY WORDS: metal pipeline; peeling coating; crevice corrosion; cathodic protection; potential distribution; geometry model; simulation

金属管道埋在地下容易受到四周环境的影响逐渐腐蚀或者损坏, 据不完全统计, 全世界每年因金属管道的腐蚀而损耗的资金达到上千亿美元。金属管道的腐蚀问题是当今普遍存在的和难以解决的问题。中国的燃气管道材料大多数是金属材料, 金属管道埋在地下经常会发生局部腐蚀现象而造成漏气或者漏水, 造成的经济损失相当严重, 有时还会危害到群众的生命及财产安全, 因此, 必须要对城市燃气管道缝隙腐蚀采取防腐措施。

阴极保护是当前比较先进的防止金属腐蚀技术, 主要应用在地下管道、船舶、港口和化工管道等, 涉及范围比较广, 与其他防腐技术相比, 阴极保护可以降低腐蚀速率, 延长金属管道的使用寿命; 但是, 金属管道缝隙腐蚀表面电位分布是阴极保护的重要性能指标^[1], 只有金属管道缝隙腐蚀表面阴极保护的电位在允许的数值范围内, 才能很好地降低管道腐蚀速度。埋地的金属管道缝隙腐蚀表面电位分布相当复杂, 很难对其进行预测。当前, 许多研究人员对金属管道缝隙腐蚀阴极保护展开了研究。文献[2—4]介绍了中国金属管道腐蚀采用阴极保护的原则及不足现象, 针对阴极保护提出了许多建议, 包括阴极保护计算的数值模拟、阴极保护电流密度评估及阴极保护技术的管理水平等。文献[5—7]提出了数值仿真技术在管道腐蚀阴极保护中的应用, 介绍了数值仿真模型, 仿真中所需要采用有限元软件、边界元方法, 对国内外金属管道腐蚀阴极保护中的应用情况做了详细地阐述。文献[8—9]比较了当前埋地金属管道腐蚀阴极保护电位测量的几种方法, 提出了密间隔电位测量方法及应用场合, 介绍了金属管道在特殊环境中测量时需要注意的问题。以往研究金属管道腐蚀的阴极保护电位提出了很多方法, 但是没有具体实施。对此, 文中采取矩形缝隙模型对金属管道缝隙腐蚀速

度和阴极保护电位分布进行预测, 构建数学模型, 推导化学反应相关方程式, 对金属管道腐蚀的初始及边界条件进行约束; 采取 MATLAB 软件对管道表面电位分布规律和缝隙腐蚀速度进行仿真验证, 并且与实测值进行比较, 为阴极保护的金属管道表面腐蚀速率控制研究提供预测模型。

1 创建几何模型

缝隙腐蚀是一种复杂的电化学过程^[10—11]。缝隙腐蚀过程的电位和电流密度取决于离子的迁移和化学反应动力学, 化学和电化学参数在缝隙中不仅相互影响, 而且随时间和空间的变化而变化。金属管道缝隙腐蚀几何模型见图 1。

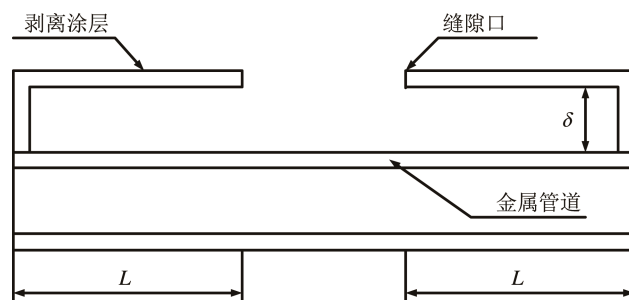


图 1 金属管道缝隙腐蚀示意

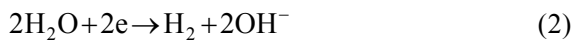
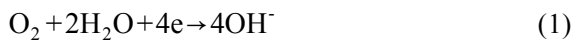
Fig.1 Schematic diagram of crevice corrosion of metal pipeline

文中根据剥离缝隙的对称性和溶液的均匀性创建矩形缝隙模型。当金属剥离涂层脱落金属管道表面时, 缝隙形式位于脱离区域的边缘。通常情况下, 缝隙的宽度 δ 比较小, 缝隙的长 L 与宽的比值较大, 因此, 文中的缝隙腐蚀模型主要研究一维(沿 x 轴)仿真模型。扩散和电移控制离子运动, 离子浓度、局部电位和电流密度分布是沿着 x 轴方向, 原点位于腐蚀缝隙口。本体溶液从外表面扩散到缝隙的内表面, 由化学和电化学过程将本体溶液转变为缝隙溶液。

2 构造数学模型

2.1 模型条件

该模型中所用的体积溶液是一种稀溶液, 模拟土壤地下水和饱和空气。所有测试均在室温下和标准大气压力下进行。当采取阴极保护来抑制缝隙腐蚀时, 通常缝隙外的本体溶液是无限的, 可以假定本体溶液中的离子浓度是恒定的。当缝隙腐蚀是由阴极保护控制时, 缝隙内溶液变为碱性溶液, 阳极溶解反应过程被抑制。缝隙中的主要反应有吸氧反应和析氢反应^[12], 见式(1)~(2)。



在阴极保护条件下缝隙腐蚀发生的离子扩散和电迁移过程中, 因为缝隙比较狭窄, 缝隙溶液是一个静态状态和对流的离子, 可以忽略不计, 因此, 在大规模运输过程中, 将考虑氢氧离子、氯离子、氯化钠和氧气, 稀溶液符合纽曼的电中性规律。在这个模型中, 长与宽的比值较大, 电位梯度和浓度梯度可以被视为 0, 沿缝隙长度方向只考虑化学和电化学参数。此外, 金属管道的电位是相等的, 并且电流仅由离子的电迁移产生。

2.2 物质运输方程

一个给定的物质的运输 i 由 3 种机制控制, 分别为扩散、电迁移和对流。该物质在稀溶液流量 N_i 方程式^[13]见式(3)。

$$N_i = -z_i u_i F C_i \frac{\partial \phi}{\partial x} - D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + v C_i \quad (3)$$

式中: N_i 为物种的通量 ($\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); u_i 为物质流动性 ($\text{m} \cdot \text{V}^{-1}$); $u_i = D_i / RT$, 法拉第常数 $F = 96\,500 \text{ C/mol}$; z_i 为电荷数; C_i 为物质的浓度; ϕ 为系统静电电位; D_i 为扩散系数; v 为描述电解质运动的速度。

在文中, 该溶液电解质运动的速度为 0, 则:

$$N_i = \frac{-z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial \phi}{\partial x} - D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad (4)$$

沿缝隙长度方向运输的物质 i 由质量守恒方程可以得:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla N_i + R_i \quad (5)$$

式中: R_i 为品种的生产或消耗率 i 的化学反应, $R_i = i_1 / nF$, i_1 为反应电流密度, n 为电荷转移数, 因

此, 式(5)表达如下:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{zF}{RT} D_i \left(\frac{\partial C_i}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + C_i \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) + D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + \frac{i_1}{nF} \quad (6)$$

2.3 电化学动力学方程

当缝隙腐蚀达到阴极保护状态时, 电位变化缓慢, 逐渐达到稳定状态。物体的电位取决于缝隙的长度。根据欧姆定律和拉普拉斯方程^[14], 推导出缝隙控制电位方程如下所示:

$$\frac{dE}{dx^2} = -\frac{i}{k\delta} \quad (7)$$

式中: k 为电解质溶液的电导率; δ 为间隙宽度; i 为缝隙中的电流密度。

对于阴极反应, 电流密度 i_o 吸氧反应由电迁移和扩散控制, i_H 的析氢反应由放电过程控制。控制方程分别为:

$$i_o = i_o^0 \frac{C_o}{C_o^b} \exp\left(\frac{E - E_{e,o}}{\beta_{c,o}}\right) \quad (8)$$

$$i_H = i_H^0 \exp\left(-\frac{E - E_{e,H}}{\beta_{c,H}}\right) \quad (9)$$

一般情况下, 阴极保护电位施加在缝隙口从 -0.9 V 至 -1.2 V , 主要是避免过高电压。然而, 缝隙的内表面是碱性的, 并且在测试方面的电位在 -1.2 V 以下, 所以电流 i_H 几乎接近于 0, 那么反应电流密度约等于电流 i_o , 因此, 在缝隙中的电位电子的表达见式(10)。

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = -\frac{i_o}{k\delta} \exp\left(-\frac{E - E_{e,o}}{\beta_c}\right) \quad (10)$$

式中: $E_{e,o}$ 为氧还原电位; β_c 为金属和溶液表面的反应动力学常数。由式(10)可以得到:

$$i = \frac{4i(0)}{x^2 i(0) \frac{2C_o^b}{C_o i_o^0 k \delta \beta_c} - 4x \left(\frac{2C_o^b i(0)}{C_o i_o^0 k \delta \beta_c} \right) + 4} \quad (11)$$

$$E = E(x_0) + 2\beta_c \ln \left(1 + \frac{x - x_0}{b} \right) \quad (12)$$

式中: $i(0)$, $E(x_0)$ 分别为初始电流密度和电位; C_o 为氧浓度; i_o^0 为氧还原的初始电流密度, C_o^b 为本体溶液中氧的浓度, b 的常数和电位梯度分别表达见式(13)~(14)。

$$b = \sqrt{\frac{2k\delta\beta_c}{i_o^0 \frac{C_o}{C_o^b} \exp\left[-\frac{E(x_0)}{\beta_c}\right]}} \quad (13)$$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{2\beta_c}{x-x_0+b} \quad (14)$$

2.4 数学模型

根据缝隙腐蚀几何模型和稀氯化钠溶液, 推导出阴极保护电位瞬态条件下的缝隙腐蚀质量守恒偏微分方程。氢氧离子、氯离子、钠离子和氧气物质分别表示如下。

对于氢氧离子物质, 标记为 1, 电荷数为-1:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = -\frac{FD_1}{RT} \left(\frac{\partial C_1}{\partial x} \frac{\partial E}{\partial x} + C_1 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} \right) + D_1 \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} + \frac{i_0}{F} \quad (15)$$

对于氯离子物质, 标记为 2, 电荷数为-1:

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = -\frac{FD_2}{RT} \left(\frac{\partial C_2}{\partial x} \frac{\partial E}{\partial x} + C_2 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} \right) + D_2 \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} \quad (16)$$

对于钠离子物质, 标记为 3, 电荷数为 1:

$$\frac{\partial C_3}{\partial t} = \frac{FD_3}{RT} \left(\frac{\partial C_3}{\partial x} \frac{\partial E}{\partial x} + C_3 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} \right) + D_3 \frac{\partial^2 C_3}{\partial x^2} \quad (17)$$

对于 O₂ 物质, 标记为 0, 电荷数为 0:

$$\frac{\partial C_0}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C_0}{\partial x^2} - \frac{i_0}{4F} \quad (18)$$

4 种物质都是在电中性条件, 可以推导出如下所示的方程:

$$\sum z_i C_i = 0 \quad (19)$$

$$-C_1 - C_2 + C_3 = 0 \quad (20)$$

由法拉第定律^[15]可知, 通过物质迁移引发的电流密度 i_2 表达式为:

$$i_2 = F \sum_{i=1}^4 z_i N_i \quad (21)$$

缝隙中电位 E 和电解质溶液的电导率由式(4), (21)可以推导出得:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{i_2}{k} - \frac{F}{k} \sum z_i D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad (22)$$

$$k = \frac{F^2}{RT} \sum z_i D_i C_i \quad (23)$$

因此, 根据式(3), (21), (23)可以推导出电流密度 i_2 :

$$i_2 = \frac{\sum_{i=1}^4 z_i D_i \frac{\partial C_i}{\partial x}}{1 - \frac{\sum_{i=1}^4 z_i D_i C_i}{F \sum_{i=1}^4 z_i^2 D_i C_i}} \quad (24)$$

3 模型边界及初始条件

缝隙口的边界条件是所有溶液的浓度是恒定不变的。在没有阴极保护的情况下所施加的电位在缝隙口也可以被确定, 或当阴极保护存在时, 它是给定的一个固定值。当初始时间为 0 时, 在缝隙中物质浓度等于本体溶液浓度, 而且在缝隙口的电位等于所施加的电位。此外, 在缝隙口底部, 物质的浓度梯度接近于 0。边界条件可以用如下方程式表达:

$$t=0, C_i = C_i^b (i=0,1,2,3, 0 \leq x \leq L) \quad (25)$$

$$x=0, C_i = C_i^b (i=0,1,2,3, E=E(x_0)=E_{CP}) \quad (26)$$

$$x=L, \frac{\partial C_i}{\partial x} = 0, \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{2\beta_c}{L-x_0+b} (i=0,1,2,3, t \geq 0) \quad (27)$$

式中: C_i^b 为本体溶液的浓度; $E(x_0)$ 为缝隙口的电位; E_{CP} 为阴极保护电位。

4 模型仿真

金属管道缝隙腐蚀表面电位分布比较复杂, 采用常规的测量方法虽然精确, 但是效率太低, 从而浪费了大量的劳动力。文中采用数学模型验证缝隙腐蚀表面电位分布规律, 使用阴极保护电位实验装置, 通过 MATLAB 软件对模型进行仿真, 测试金属管道选择 45#钢管, 仿真参数: 钢管外径为 146 mm, 钢管壁厚为 20 mm, 钢管屈服强度为 355 MPa, 钢管抗拉强度为 600 355 MPa, 本体溶液浓度 $C_b=0.025$ mol/L, 本体溶液 pH=6.92, 大气压力 $P=101.3$ kPa, 系统温度 $T=299$ K, 法拉第常数 $F=96\ 500$ C/mol, 气体常数 $R=8.4$ J/(mol·K), 阴极保护电位 $E_{CP}=-1.1$ V, 缝隙宽度 $\delta=0.48$ mm, 极化时间 $t_1=50$ h, 缝隙深度 $L=90$ mm, 缝隙表面腐蚀时间 $t_2=5$ a。缝隙底部电位分布随时间变化曲线的仿真结果与实验结果见图 2, 缝隙底部电位实验测量值和模型仿真值的部分数据比较见表 2。缝隙底部电位分布随缝隙深度变化曲线的仿真结果与实验结果见图 3, 缝隙深度电位实验测量值和模型仿真值的部分数据比较见表 3。缝隙表面腐蚀速度随时间的变化曲线的仿真结果与实验结果见图 4, 缝隙表面腐蚀速度实验测量值和模型仿真值的部分数据比较见表 4。

由图 2 可知, 缝隙腐蚀底部的电位随着时间的

增加反向增大，电位反向增加的梯度随着时间的增加而逐渐减小，在 50 h 内最大值为-8.6 V。由图 3 可知，缝隙电位随着深度的增加反向减小，电位反向减小的梯度随着深度的增加而逐渐减小，在 10 cm 内最小值为-0.78 V。由图 4 可知，缝隙表面腐蚀速度随着时间的增大而逐渐减小，腐蚀速度最小值达到 0.334 mm/a。由表 1—3 可知，模型仿真的电位值、腐蚀速度值与实验测量值误差较小，相对误差都在 5%以内。另外，金属管道缝隙表面仿真的电位与实

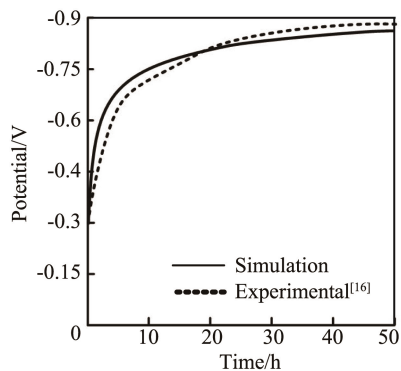


图 2 不同时间缝隙底部电位分布规律

Fig.2 Distribution of potential at the bottom of the crevice at different time

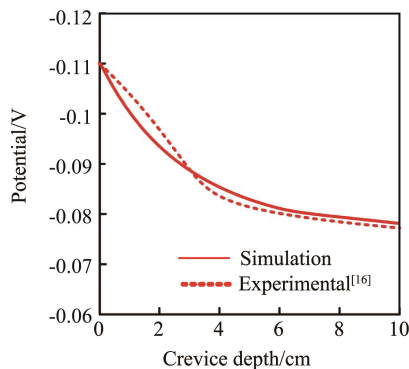


图 3 不同缝隙深度电位分布规律

Fig.3 The potential distribution of different crevice depth

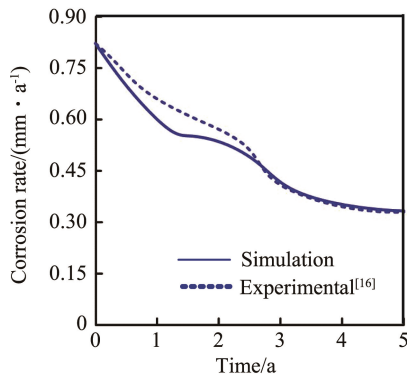


图 4 缝隙表面腐蚀速度

Fig.4 Crevice surface corrosion rate

表 1 不同时间缝隙底部电位实验结果和仿真结果
Tab.1 Experimental and simulation results of crevice bottom potential at different times

Time/h	Experimental potential ^[16] /V	Simulation potential/V	Error/%
5	0.66	0.69	4.5
10	0.72	0.75	4.1
20	0.82	0.81	3.8
30	0.86	0.84	2.3
40	0.87	0.85	2.3
50	0.88	0.86	2.3

表 2 不同缝隙深度电位实验结果和仿真结果
Tab.2 Experimental and simulation results at different crevice depth potential

Depth/cm	Experimental potential ^[16] /V	Simulation potential/V	Error/%
1	-1.04	-1	3.8
2	-0.97	-0.94	3.1
4	-0.84	-0.86	2.4
6	-0.8	-0.81	1.3
8	-0.78	-0.79	1.3
10	-0.77	-0.78	1.3

表 3 不同年度缝隙表面腐蚀速度
Tab.3 Crevice surface corrosion rate in different years

Time/a	Experimental speed ^[16] /(mm·a ⁻¹)	Simulation speed/(mm·a ⁻¹)	Error/%
0	0.845	0.805	4.7
1	0.621	0.602	3.1
2	0.541	0.548	1.5
3	0.422	0.426	0.9
4	0.363	0.365	0.6
5	0.335	0.334	0.3

验测量值误差越小，采用阴极保护的金属管道表面缝隙腐蚀速率预测越精确，因此，该模型能较好地模拟实际条件下金属管道的阴极保护电位分布规律和缝隙腐蚀速度。采用该模型仿真的结果可以为油气管道的阴极保护提供理论依据。

5 结语

文中采用矩形缝隙模型研究了埋地金属管道表面的阴极保护电位分布规律和缝隙腐蚀速度。创建了缝隙的几何模型，构造了缝隙腐蚀数学模型，对电位方程式进行了推导，对初始条件及边界条件进行了相关约束。采取 MATLAB 软件对金属管道表面电位分布和缝隙腐蚀速度进行了仿真，同时，

与以往实验测量的数据结果进行了对比和分析。研究结果表明,文中所采用的金属管道表面的阴极保护电位分布规律和缝隙腐蚀速度与实验测量值相对误差都在 5%以内,误差很小,效果较好,为金属管道腐蚀控制的研究提供了参考。

参考文献

- [1] 邢少华, 李焰, 马力, 等. 深海工程装备阴极保护技术进展[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 49—52.
XING Shao-hua, LI Yan, MA Li, et al. Research Progress in Cathodic Protection Technology for Marine Infrastructures in Deep Sea Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 49—52.
- [2] 薛致远, 毕武喜, 陈振华, 等. 油气管道阴极保护技术现状与展望[J]. 油气储运, 2010, 33(9): 938—943.
XUE Zhi-yuan, BI Wu-xi, CHEN Zhen-hua, et al. Situation and Outlook for Cathodic Protection Technology of Oil & Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 33(9): 938—943.
- [3] 陈利琼, 李卫杰, 孙磊. 油气管道阴极保护效果评估技术研究[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(9): 41—45.
CHEN Li-qiong, LI Wei-jie, SUN Lei. Impact Assessment Technology Research of Oil and Gas Pipeline Cathodic Protection[J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(9): 41—45.
- [4] NAROZNY M, ZAKOWSKI K, DAROWICKI K. Method of Sacrificial Anode Transistor-driving in Cathodic Protection System[J]. Corrosion Science, 2014, 88(6): 275—279.
- [5] 张玉志, 王玉梅, 刘玲莉, 等. 数值仿真技术在长输管道阴极保护中的应用进展[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(12): 969—971.
ZHANG Yu-zhi, WANG Yu-mei, LIU Ling-li, et al. Applied Development of Numerical Simulation Technology in Pipeline Cathodic Protection[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(12): 969—971.
- [6] LIU C, SHANKAR A, ORAZEM M E, et al. Numerical Simulations for Cathodic Protection of Pipelines[J]. Underground Pipeline Corrosion, 2014, 43(21): 85—126.
- [7] 潘柳依, 雷宝刚, 范铮, 等. ANSYS 有限元法在管道阴极保护中的应用[J]. 材料保护, 2014, 47(3): 45—47.
PAN Liu-yi, LEI Bao-gang, FAN Zheng, et al. Application of ANSYS Finite Element Method in Cathodic Protection of Pipelines[J]. Journal of Materials Protection, 2014, 47(3): 45—47.
- [8] 李自力, 谢跃辉, 郝宏娜, 等. 埋地管道阴极保护电位测量方法研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(1): 55—58.
LI Zi-li, XIE Yue-hui, HAO Hong-na, et al. Research Progress of Measurement Methods for Cathodic Protection Potential of Buried Pipelines[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(1): 55—58.
- [9] 袁昕, 朱小铁. 钢质管道外腐蚀直接评价(ECDA)过程中密间隔电位(CIPS)检测方法的应用[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(7): 33—37.
YUAN Xi, ZHU Xiao-tie. Pipeline External Corrosion Direct Assessment(ECDA) Close Interval Potential Survey (CIPS) Application of Detection Method[J]. Total Corrosion Control, 2015, 29(7): 33—37.
- [10] 张方卓. 不锈钢及焊缝的电化学腐蚀性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
ZHANG Fang-zhuo. Study Electrochemical Corrosion of Stainless Steel and Welding Seam By[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [11] 肖博, 张振林, 麻思达, 等. 热循环、腐蚀和自然时效对 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. 精密成形工程, 2015, 7(5): 59—64.
XIAO Bo, ZHANG Zhen-lin, MA Si-da, et al. Effects of Thermal Cycles, Corrosion, and Natural Aging on the Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al2024 Joints[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(5): 59—64.
- [12] 熊娟, 郑兴文, 张文艳, 等. 西南地区某输油管道外腐蚀分析[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 59—63.
XIONG Juan, ZHEN Xing-wen, ZHANG Wen-yan, et al. Analysis on the External Corrosion for an Oil Pipeline in Southwest China[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 59—63.
- [13] SHIPILOV S A, MAY I L. Structural Integrity of Aging Buried Pipelines Having Cathodic Protection[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 13(5): 1161—1173.
- [14] KONSOWA A H, ELSHAZLY A H. Rate of Zinc Consumption During Sacrificial Cathodic Protection of Pipelines Carrying Saline Water[J]. Desalination, 2013, 153(2): 223—226.
- [15] ALLAHKARAM S R, ISAKHANI-ZAKARIZ M, DERAKHSHAN M, et al. Investigation on Corrosion Rate and a Novel Corrosion Criterion for Gas Pipelines Affected by Dynamic Stray Current[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26(9): 453—460.
- [16] XU L Y, CHENG Y F. Experimental and Numerical Studies of Effectiveness of Cathodic Protection at Corrosion Defects on Pipelines[J]. Corrosion Science, 2014, 78(1): 163—170.