

土壤电阻率和阳极埋设方式对长输管线阴极保护电位分布的影响

李自力, 崔淦, 尚兴彬, 刘妍

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 青岛 266580)

摘要: 为了研究土壤电阻率和阳极埋设方式对长输管线阴极保护电位分布的影响, 建立了长输管线阴极保护的简单物理模型, 利用边界元算法的管单元法建立相应的数学模型, 采用 Matlab 编程进行模拟求解。首先设计试验验证模拟结果的正确性, 然后分别设定了不等的电阻率以及不同的阳极埋设方式进行模拟计算。结果表明, 不同的土壤电阻率和不同的阳极埋设方式均会对长输管线阴极保护电位的分布产生很大影响。

关键词: 土壤电阻率; 阳极埋设方式; 阴极保护电位; 边界元法

中图分类号: TG174.41

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2013)07-0566-03

Influence of Soil Resistivity and Anode on Cathodic Protection Potential Distribution of Long Distance Pipeline

LI Zi-li, CUI Gan, SHANG Xing-bin, LIU Yan

(College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: In order to study the influence of soil resistivity and anode placement manner on cathodic protection potential distribution of long distance pipelines, a physical model of the long distance pipeline cathodic protection potential distribution was established, the mathematic model of the potential distribution defined by the tube element method of the boundary element algorithm, and the Matlab programming tools were used to solve the model. To verify the correctness of the simulation results firstly and then simulation calculation was performed under different conditions of resistivity and anode placement manner. The results show that the soil resistivity and anode placement manner have great impact on the cathodic protection potential distribution of long distance pipelines.

Key words: soil resistivity; anode placement manner; cathodic protection potential; boundary element method

季节的变化导致土壤的温度、含水量、含氧量及微生物等的变化, 而上述因素又直接或间接的影响土壤的电阻率^[1]。土壤电阻率的全年变化, 势必会导致长输管线阴极保护电位分布的变化。因此, 研究土壤电阻率对阴极保护电位分布的影响, 可以指导阴极保护站随季节的变化作出相应的调整。

阳极的埋设方式同样会对长输管线阴极保护电位的分布产生影响。阳极的主要埋设方式有近管道浅埋分布式阳极布置、沿着管道敷设的柔性阳极布置以及深井阳极布置。不同的埋设方式导致不同的阴极保护电位分布规律, 而且, 不同的阳极埋深及

阳极距离管道的水平距离的不同也会对阴极保护电位分布规律产生影响。因此, 有必要对阳极的埋设方式对阴极保护电位的分布的影响进行研究。

1 物理模型的建立及边界条件的处理

外加电流阴极保护系统的简单物理模型见图 1。由于时间、试验条件等因素的限制, 对所研究的问题

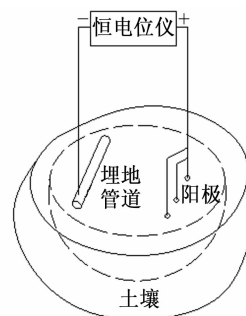


图1 阴极保护电位分布的物理模型

收稿日期: 2012-08-13

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05017-04-01); 国家自然科学基金(50804053)

通信作者: 李自力, 教授, 博士生导师, lizili@hpu.edu.cn

作了一些简化:(1) 管道沿线土壤介质为均一介质;(2) 被保护金属表面极化行为不瞬时改变;(3) 电位场为稳态场;(4) 电流通过土壤时,遵循欧姆定律;(5) 辅助阳极可以看成是集中点源,输出电流恒定。经分析推导,得出含点源的土壤中的电位满足 Poisson 方程^[2]:

$$\alpha \Delta^2 \phi = I_e \delta(X - X_e) \quad (1)$$

对于均一介质,阴极边界条件采用实测的阴极极化曲线,采用分段线性拟合法进行处理^[3],最后利用迭代法进行求解。

2 边界元算法求解

采用管单元法对管道进行离散,采用管单元法的优点是:离散后,单元数和节点数大大减少,为编程计算带来很大的方便。离散结果如图 2 所示。

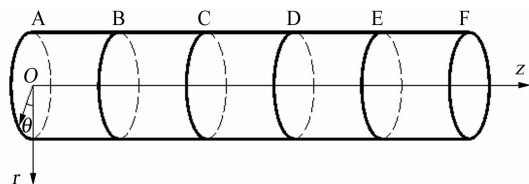


图2 管表面离散

采用管单元法的前提条件是^[4]:(1) 被保护体的几何形状适宜进行柱面单元分割;(2) 同一柱面单元截口线上的电位可视为基本相同。

已知边界积分方程的基本解是 $\frac{1}{4\pi r}$ ^[5], r 为节点到源点的距离。因此,当边界节点与源点重合时,积分会产生奇异性,要单独处理。

2.1 非奇异系数的计算

用上述的管单元离散边界,应用标准的 BEM 公式,通过积分变化得到各单元的系数矩阵^[6]:

$$G_{i,jm}(t) = 4 \frac{RL}{4\pi} |J| \varphi_m(t) \frac{4K(k)}{[(R+B)^2 + (Lt - Z_m)^2]^{1/2}} \quad (2)$$

$$H_{i,jm}(t) = |J| \varphi_m(t) \frac{-RL}{[(R+B)^2 + (Lt - Z_m)^2]^{1/2} \pi} \frac{(Lt - Z_m)E(k)}{[(R-B)^2 + (Lt - Z_m)^2]^2} \quad (3)$$

以上两式中, $i \neq j$ 。 $K(k)$ 是第一类完全椭圆积分, $E(k)$ 是第二类完全椭圆积分,在 Matlab 中直接调用即可; J, B 是坐标变换的结果; t 为局部坐标; Z_m 为管的最后节点的第三坐标。

2.2 奇异系数的计算

对于半无限域的情形:

$$H_{ii} = - \sum H_{ij}, i \neq j \quad (4)$$

对 G_{ii} 的求解采用解析法^[7],

$$G_{ii} = \frac{L}{2\pi} [1 - \ln(\frac{L}{16r})] \quad (5)$$

最后对式(2),(3)进行数值积分,对上述问题所得的标准的 BEM 系统结果是:

$$\{G\} \times \{Q\} = \{H\} \times \{\varphi - \eta(Q)\} \quad (6)$$

3 试验验证

为了验证数值模拟结果的正确性,采用室内阴极保护模拟试验箱作了验证试验。试验箱为一木制箱体,尺寸为 8 000 mm×1 800 mm×800 mm(长×宽×高),上部用绝缘板覆盖,四周和底部铺设聚氯乙烯板,起到绝缘作用。箱内埋设一条材质 Q235,尺寸为 20 mm×3 mm×6 000 mm(外径×壁厚×长度)的钢管,埋深为 0.5 m。选用一直径为 30 mm、长度为 100 mm 的圆柱形废旧钢材作为辅助阳极,表面进行处理,埋深 0.5 m,距离管道为 0.3 m,无阳极填充料。采用四电极法进行土壤电阻率的测试,测得土壤电阻率为 10 Ω·m。在管道上每隔 60 cm 设置一个测试点(管道两端点不设),用 DJS-292 双显恒电位仪对管道施加阴极保护。试验装置如图 3 所示。文中电位若无特指,均相对于 CSE。

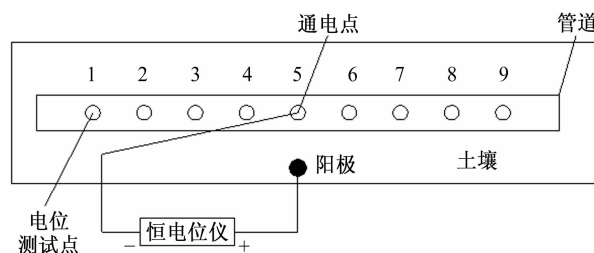


图3 试验箱布置图

试验用 NIUSB6210 采集卡进行实时数据采集,用辅助试片断电法自动采集阴极保护电位数据。

4 结果与讨论

4.1 模拟结果正确性验证

试验中测试的阴极保护电位数据如表 1 所示。实测数据与模拟结果对比见图 4。

由图 4 可见,两者相差很小,误差除了中间点稍

表 1 试验测试数据

测试点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
电位值/V	-1.188	-1.19	-1.192	-1.197	-1.2	-1.196	-1.193	-1.19	-1.188

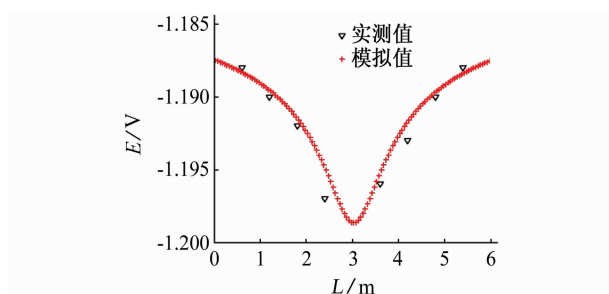


图4 实测数据与模拟结果对比图

大之外,其余误差都很小。因此,所编程序能很好地模拟管表面的电位分布,这为后面进行更深一步的讨论提供理论依据。

4.2 土壤电阻率对阴极保护电位分布的影响

分别设置土壤电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$, $20 \Omega \cdot \text{m}$, $30 \Omega \cdot \text{m}$ 和 $40 \Omega \cdot \text{m}$, 其余参数设置跟试验中的一致。通过 Matlab 计算所得结果如图 5 所示。

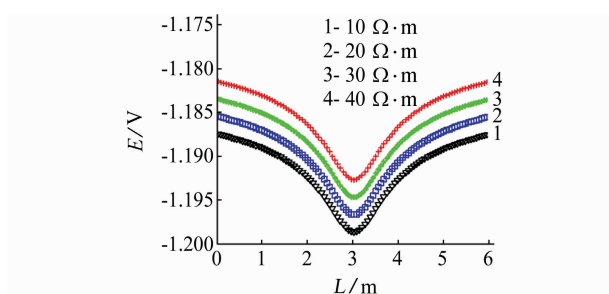


图5 不同土壤电阻率对阴极保护电位的影响

由图 5 可见,阴极保护电位随着土壤电阻率的增大而正向偏移。这是由于土壤电阻率的增大使得流入管中电流密度减小,管道表面的阴极极化作用减弱所致。

4.3 阳极埋设方式对阴极保护电位分布的影响

4.3.1 三种埋设方式对阴极保护电位分布的影响

分布式阳极采用 4 个辅助阳极,均匀布置在管道一侧,间隔 2 m;柔性阳极采用 21 个辅助阳极近似代替,其余参数设置跟试验中的一致。模拟结果如图 6 所示。

图 6 中,(a)所示是三种布置方式的总图,为了显示图清晰,(b),(c),(d)分别为三种情况的放大图。由模拟结果(a)可知,当输出电流相等时,柔性阳极对应的阴极保护电位最负,分布式阳极次之,深井阳极最正。由放大图可知,深井阳极呈现漏斗形;分布式阳极阴极保护电位波动较大,且在阳极点处出现波谷;柔性阳极电位分布是一条光滑的曲线,电位变化均匀,且在中央位置电位达到最负值。

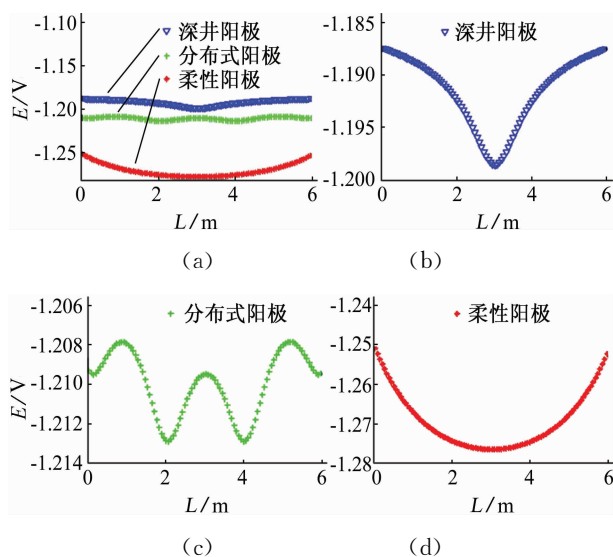


图6 不同阳极埋设方式对电位分布的影响

4.3.2 阳极埋深及距管道水平距离对电位分布的影响

分别模拟了水平距离相同,埋深分别为 0.5 m, 1 m 和 1.5 m 的电位分布和埋深相同,水平距离分别为 0.3, 0.6, 0.9 m 的电位分布,其余参数这只跟试验参数一致,模拟结果如图 7 所示。

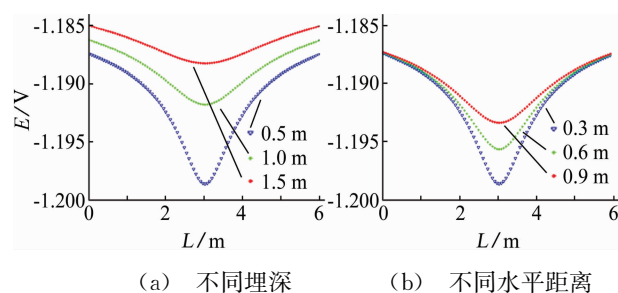


图7 不同埋深和水平距离对电位分布的影响

由模拟结果可知,随着深度或距离的增加,阴极保护电位正向移动,电位分布趋于均匀,这是因为距离管道越远,辅助阳极与管道之间土壤的电阻越大,从而电流流经土壤所造成的电位降越大,阴极极化作用减弱。

5 结论

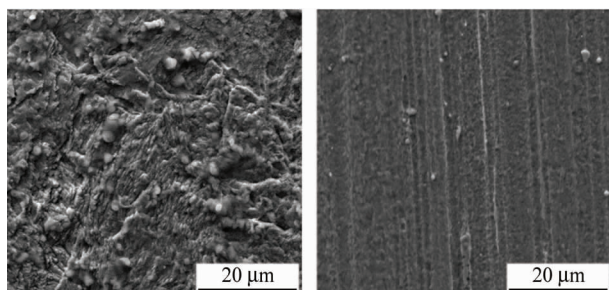
(1) 所建立的模型及所编程序能很好地模拟阴极保护电位的分布,误差很小。

(2) 随着土壤电阻率的增加,阴极保护电位向正方向移动。

(3) 三种不同的阳极埋设方式对阴极保护电位的影响很大。柔性阳极对应的阴极保护电位最负,

(下转第 572 页)

大量的腐蚀产物和腐蚀坑,而加入 2-PCT 后,试片表面明显平整,仍可见碳钢表面打磨过的痕迹。说明了缓蚀剂分子吸附在金属基体表面形成了保护膜,抑制了碳钢在盐酸溶液中的腐蚀。



(a) 元缓蚀剂 (b) $1.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 2-PCT

图 5 Q235 钢浸泡在 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 溶液中
8 h 后的 SEM 图

3 结论

(1) 2-PCT 缓蚀剂在 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 溶液中对 Q235 钢具有良好的缓蚀作用,并且缓蚀率随缓蚀剂浓度的增大而增大。

(2) 2-PCT 缓蚀剂在 Q235 钢表面的吸附符合 Langmuir 吸附等温式,吸附过程既包括物理吸附,也包括化学吸附。

(3) 动电位极化曲线表明,2-PCT 缓蚀剂是以阴极型为主的混合型缓蚀剂。

参考文献:

- [1] 付惠,李向红,邓书端,等. 核桃叶提取物在盐酸介质中对钢的缓蚀性能[J]. 腐蚀与防护,2012,33(1):20-22.
- [2] 陶志华,李伟华,张胜涛,等. 新型杂环化合物在 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_2SO_4 中对 Q235 钢的缓蚀性能[J]. 腐蚀与防护,2009,30(6):364-368.
- [3] 张胜涛,陶志华,李伟华,等. 新型三氮唑化合物在 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 中对 Q235 钢的缓蚀性能[J]. 中国腐蚀与防护学报,2009,29(6):487-492.
- [4] Tebbji K, Oudda H, Hammouti B, et al. Inhibition effect of two organic compounds pyridine-pyrazole type in acidic corrosion of steel[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochem,2005,259(1):143-149.
- [5] Abd El-Maksoud S A, Fouda A S. Some pyridine deriv-

atives as corrosion inhibitors for carbon steel in acidic medium[J]. Materials Chemistry and Physics,2005,93(1):84-90.

- [6] 李冬青,谭明雄,刘星,等. 吡啶甲醛缩氨基硫脲类席夫碱的合成[J]. 化工时刊,2004,18(11):36-40.
- [7] 李向红,邓书端,付惠,等. 烯丙基硫脲对硫酸溶液中钢的吸附与缓蚀作用机理[J]. 腐蚀与防护,2011,32(12):958-961.
- [8] Tang Y M, Yang X Y, Yang W Z, et al. A preliminary investigation of corrosion inhibition of mild steel in $0.5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ by 2-amino-5-(n-pyridyl)-1,3,4-thiadiazole: Polarization, EIS and molecular dynamics simulations [J]. Corrosion Science,2010,52(6):1801-1808.

(上接第 568 页)

且电位变化平滑;分布式阳极对应阴极保护电位次之,且电位分布波动较大,在阳极对应点出现波谷;深井阳极对应阴极保护电位最正,电位分布呈现漏斗形,在辅助阳极处电位最负。

(4) 随着阳极埋深或水平距离的增加,阴极保护电位正向移动,电位趋于均匀。

参考文献:

- [1] 龙学渊. 埋地管线阴极保护站输出参数调整研究[D]. 成都:西南石油大学硕士学位论文,2007.
- [2] 梁成浩,袁传军,黄乃宝. 边界元法计算冻土层管道阴极保护时的电位分布[J]. 大连海事大学学报,2011,11(4):109-112.
- [3] 郝红娜,李自力,王太源,等. 阴极保护数值模拟计算边界条件的确定[J]. 油气储运,2011,30(7):504-507.
- [4] 孟宪级,吴中元,梁旭巍,等. 区域性阴极保护数学模型算法的改进[J]. 中国腐蚀与防护学报,1998,19(19):221-226.
- [5] 陈静. 输气站场区域性阴极保护数值模拟及阳极位置优化研究[D]. 成都:西南石油大学硕士学位论文,2009.
- [6] Brichau F, Deconinck J. A numerical model for cathodic protection of buried pipes[J]. Corrosion Science, 1994,49(1):40-49.
- [7] 吴洪潭. 边界元法在传热学中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008,6(1):60-62.