

阴极保护检查片接地电阻数值模拟与实验研究

赵会军^{1a,1b}, 杜鹏宇^{1a,1b}, 董亮^{1a,1b}, 杜艳霞², 宋琳琳^{1a,1b}

(1.常州大学 a.江苏省油气储运技术重点实验室 b.石油工程学院,
江苏 常州 213164; 2.北京科技大学, 北京 100083)

摘要: **目的** 研究阴极保护检查片结构及埋设方式对其接地电阻的影响。**方法** 基于边界元平台建立常用检查片的边界元模型,从检查片形状、裸露面积、壳体大小、埋深和土壤电阻率等方面探讨其对检查片接地电阻的影响及规律,计算了检查片接地电阻在检查片对地总电阻中的比重,并将检查片接地电阻的实验值与边界元模拟结果进行对比。**结果** 随着极化电位负移,检查片接地电阻所占比重增大,最大接近 95%。检查片裸露面积从 6.5 cm² 增加至 50 cm²,其接地电阻降低约 1/2。同一裸露面积下,圆形检查片接地电阻最大,长方形的最小,两者相差 1.7 倍左右。当壳体面积为检查片 7 倍等效圆直径面积时,接地电阻接近最大值,检查片接地电阻随土壤电阻率增大而成倍增加。在单一土壤环境中,检查片埋深在 0.2 m 以下时,接地电阻变化小于 2%。在边界元模拟结果中,0.2 m 埋深处,6.5 cm² 圆形检查片接地电阻模拟值比实验值小 1.4%,6.5 cm² 棒状检查片接地电阻模拟值比实验值小 6.3%。**结论** 接地电阻的实验结果与边界元模拟结果具有较好的一致性,模型合理。

关键词: 阴极保护; 检查片; 结构; 接地电阻; 边界元

中图分类号: TG174.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)01-0262-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.01.031

Numerical Simulation and Experimental Study of Grounding Resistance of Cathodic Protection Coupons

ZHAO Hui-jun^{1a,1b}, DU Peng-yu^{1a,1b}, DONG Liang^{1a,1b}, DU Yan-xia², SONG Lin-lin^{1a,1b}

(1.a.Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, b. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2.University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of structure and embedding method of cathodic protection coupons on its grounding resistances. The common boundary element of coupons was established based on boundary element platform. The influence and influence laws of the shape, exposed area, shell size, buried depth and soil resistivity on grounding resistances of coupons were discussed. Meanwhile, the proportion of grounding resistance in the total resistance of coupon to earth was

收稿日期: 2019-07-11; 修订日期: 2019-12-05

Received: 2019-07-11; Revised: 2019-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51401017); 2018 年江苏省油气储运技术重点实验室开放课题; 2019 年江苏省研究生科研与创新计划项目(SJCX19_0669)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51401017), the Open Project of Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology in 2018, Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province in 2019(SJCX19_0669)

作者简介: 赵会军(1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为油气管输技术。

Biography: ZHAO Hui-jun(1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: oil and gas pipeline transportation technology.

通讯作者: 董亮(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。邮箱: dongliang@cczu.edu.cn

Corresponding author: DONG Liang(1983—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: materials corrosion and protection. E-mail: dongliang@cczu.edu.cn

calculated and then compared with the simulation results of boundary element. The proportion of grounding resistance in total resistance of the coupon to earth increased with more negative polarization potential, and the maximum proportion was close to 95%. The grounding resistance decreased by about 2 times with the exposed area of coupons increasing from 6.5 cm^2 to 50 cm^2 . Under the same exposed area, the circular coupons had the largest grounding resistance and the rectangle coupons had the smallest grounding resistance, and the difference between the two was about 1.7 times. When the shell area increased to 7 times of the area of coupon, the grounding resistance approached the maximum value. The grounding resistance of coupons increased linearly with the increase of soil resistivity. For single layer soil environment, the change of grounding resistance of coupons was less than 2% with buried depth below 0.2 m. In the boundary element simulation results, the calculated grounding resistance of circular coupon with area of 6.5 cm^2 and buried depth of 0.2 m was 1.4% smaller than the test result, and the simulated value of the columnar coupon with area of 6.5 cm^2 was 6.3% smaller than the experimental value. The experimental results of grounding resistance are in good agreement with the boundary element simulation results, and the model is reasonable.

KEY WORDS: cathodic protection; coupon; geometry; grounding resistance; boundary element

随着国家对地铁及高压输电系统的大力建设,埋地管道面临愈发严重的杂散电流腐蚀的威胁,存在极大的安全隐患^[1-2]。目前埋地管道外部采取防腐层和阴极保护系统防腐,通常采用阴极保护电位(即极化电位)的水平来评判防腐效果,但由于测量过程中受到杂散电流的影响,导致测量的阴极保护电位包含 IR 降,从而不能真实反映管道的极化水平^[3-4]。

检查片断电测量法能够消除该类 IR 降的影响,其操作方便,有较好可信度,应用日益广泛^[5-7]。但是目前检查片在选形和埋设方式上还存在争议。在面积选取上,国内外通常使用的检查片面积在 $6.5 \sim 50/100 \text{ cm}^2$ 之间,没有具体规定检查片面积选取规则;在形状选取上,国内标准规定的检查片形状有棒状、长方形和圆形,英国标准规定的有锥状, NACE 标准规定的有环形^[8-10];同时也没有说明检查片非裸露的壳体部分大小的要求等^[11-12]。这些因素如何影响检查片的极化水平值得关注。理论上,检查片的极化电位水平取决于流经检查片的电流密度和该检查片在临近土壤环境下的极化行为。在相同的位置埋设不同类型检查片时,检查片的极化水平主要取决于流经检查片的电流密度,即由通电电位和回路电阻(极化电阻和接地电阻)决定,而上述影响因素主要影响了检查片的接地电阻。本文以该参数为对象,拟研究明确阴极保护检查片间的差异性,这区别于以往以极化水平为对象的研究,其结果更为直观和具有针对性。

数值模拟技术广泛用于求解阴极保护电位场^[13-16],通过得出电压和电流,从而能够计算出接地电阻。本文所采用的 BEASY CP 是一款边界元计算的数值模拟软件,在阴极保护领域有广泛应用^[17-20]。通过数值模拟计算分析了检查片形状、裸露面积、壳体大小、埋深和土壤电阻率对检查片接地电阻的影响规律,并通过 X70 钢制检查片的现场实验对模拟模型进行验证,以期在现场应用提供指导。

1 参数选取与计算方法

1.1 参数选取

取计算区域为立方体空间 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,检查片相对较小,可认为局部土壤电阻率一致。设定无穷远处电位为 0 V ,检查片边界电位为 0.1 V 。选取检查片形状为:长方形、圆形、环形、锥状、棒状。常用检查片裸露面积在 $6.5 \sim 50 \text{ cm}^2$ 之间,取裸露面积为 6.5 、 10 、 20 、 50 cm^2 。壳体面积选用 5 、 7 、 10 倍检查片等效圆直径的面积,取壳体面积为 80 、 162 、 316 、 651 cm^2 。检查片理论上应与管道中心处于统一标高,同时考虑实际开挖难度,检查片取埋深为 0.2 、 0.5 、 1 、 2 m 。为了确定接地电阻与土壤电阻率的关系,取土壤电阻率为 25 、 50 、 75 、 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。几何模型与检查片参数选取如图 1、表 1 所示。

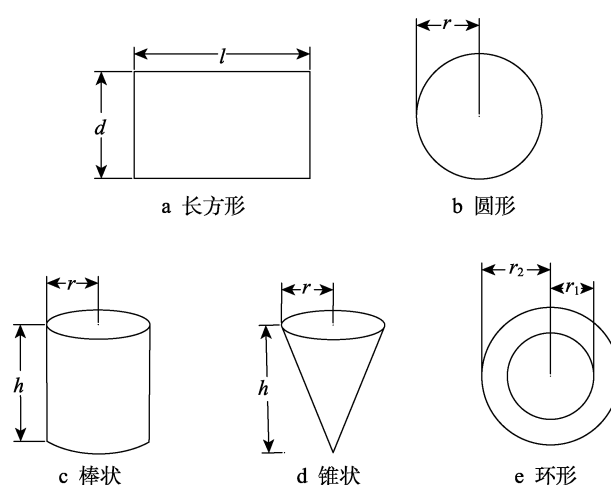


图 1 典型的检查片形状

Fig.1 Shape of typical coupon shape: a) rectangle; b) circular; c) columnar; d) taper; e) annular

表 1 检查片形状尺寸
Tab.1 Shape and size of coupon

| Shape | Size/cm | Exposed area/cm ² | Shell area/cm ² |
|-----------|--|------------------------------|----------------------------|
| Rectangle | $l=5$ $d=1.3, 2, 4, 10$ | 6.5, 10, 20, 50 | 80 |
| Circular | $r=1.44, 1.78, 2.52, 3.99$ | 6.5, 10, 20, 50 | 80 |
| Annular | $r_1=1$ $r_2=1.75, 2.04, 2.71, 4.11$ | 6.5, 10, 20, 50 | 80 |
| Taper | $r=0.8$ $h=2.57, 3.92, 7.95, 20$ | 6.5, 10, 20, 50 | 80 |
| Columnar | $r=0.625$ $h=1.34, 2.22, 4.78, 12.42$ | 6.5, 10, 20, 50 | 80 |
| Columnar | $r=0.625$ $h=1.34, 2.22, 4.78, 12.42$ | 6.5, 10, 20, 50 | 162, 316, 651 |

1.2 计算方法

检查片相对较小, 故可认为其所处土壤相对均匀, 此时电位分布满足 Laplace 方程^[12]:

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

式中: φ 为土壤各处的电位; ∇ 为 Laplace 算子假设所研究的检查片及其区域被表面 γ 所包围, 则:

$$\gamma = \gamma_A + \gamma_C + \gamma_D \quad (2)$$

式中: γ_A 为无限远处的大地, 电位为零; γ_C 为检查片的外表面, 电位为 φ_0 ; γ_D 为检查片的壳体, 为绝缘体。

接地电阻是指当电流由接地体流入土壤时, 接地体土壤周围形成的电阻。其值等于接地体相对于大地零电位位置的电压除以流经接地体的电流, 则:

$$R = \frac{\varphi_0}{I} \quad (3)$$

式中: φ_0 为检查片外表面电位; I 为流经检查片的电流。

2 模拟结果与讨论

2.1 检查片尺寸和形状的影响

对长方形、圆形、环形、锥状、棒状这 5 种形状及对应的 4 种面积 (6.5、10、20、50 cm²) 在土壤电阻率为 100 Ω·m 及 0.2 m 埋深环境中进行接地电阻计算及经验公式计算, 结果如图 2 所示。上述数据可以看出, 模拟计算出的接地电阻和经验公式所计算出的接地电阻存在较大差异, 使用经验公式并不能准确地计算各种形状、面积的检查片的接地电阻。在 6.5~50 cm² 面积下, 接地电阻最大的检查片为圆形, 最小的为长方形, 两者相差 1.74 倍。同种形状检查片, 随着面积从 6.5 cm² 增加到 50 cm², 长方形检查片的接地电阻降低最少, 为 243%, 锥状检查片接地电阻降低最多, 为 341%。

通过对检查片等效圆半径与接地电阻的分析发现, 5 种检查片等效圆半径的倒数同接地电阻之间存在线性关系 (如表 2 所示), 所得拟合公式为:

$$R = \left(a \frac{1}{r} + b \right) \frac{\rho}{100} \quad (4)$$

式中: R 为接地电阻; r 为等效圆半径; ρ 为土壤电阻率; a 为斜率; b 为截距。

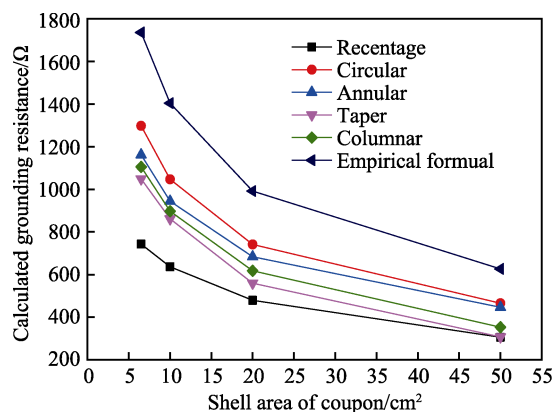


图 2 检查片形状和尺寸对接地电阻影响
Fig.2 Effect of coupon shape and size on grounding resistance

表 2 检查片拟合公式系数
Tab.2 Coefficients of fitting formulas for coupon

| Simples | Slope | Intercept |
|-----------|-------------|-------------|
| Annular | 1610.9±9.3 | 42.3±4.7 |
| Circular | 1875.6±6.5 | -4.8±3.2 |
| Columnar | 1699.3±34.1 | -65.6±17.4 |
| Taper | 1694.8±55.6 | -112.8±28.0 |
| Rectangle | 985.2±56.4 | 72.1±28.5 |

2.2 检查片壳体的影响

实际应用的检查片都会带有壳体, 考虑到壳体对检查片接地电阻的影响, 对 6.5 cm² 棒状检查片选用不同面积的壳体, 进行了接地电阻的数值模拟计算, 数值模拟计算结果如图 3 所示。对 6.5 cm² 棒状检查

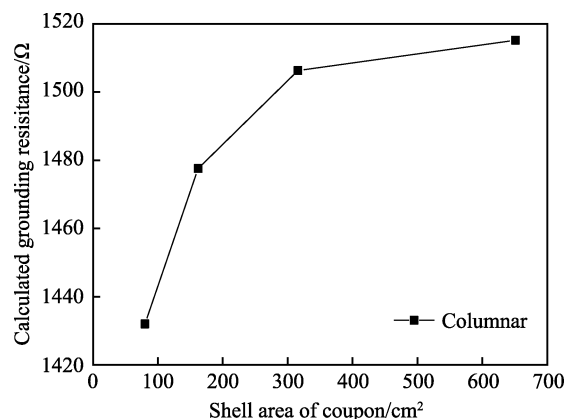


图 3 壳体面积对 6.5 cm² 棒状检查片接地电阻的影响
Fig.3 Effect of shell area on grounding resistance of 6.5 cm² columnar coupon

片来说, 当壳体面积为其 5、7、10 倍等效圆直径的面积时, 接地电阻分别变为没有壳体时的 1.33、1.36、1.37 倍。在壳体面积为其 7 倍等效圆直径的面积时, 检查片接地电阻接近最大值。

2.3 检查片埋深的影响

在进行阴极保护电位测量时, 应使阴极保护电位检查片与管道中心处于统一标高, 但实际埋设检查片时埋设深度可能远远不够。在均匀土壤电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 下, 选取 6.5 cm^2 检查片进行埋设深度接地电阻的计算, 如图 4。5 种形状检查片的接地电阻随着埋深增加, 逐渐趋于稳定: 从埋深 2 m 到埋深 1 m, 接地电阻增加约 1Ω ; 从埋深 2 m 到埋深 0.5 m, 接地电阻增加约 5Ω , 占比为 0.5%; 从埋深 2 m 到埋深 0.2 m, 接地电阻增加约 20Ω , 占比为 2%。在均匀土壤中, 检查片埋设 0.2 m 时, 可认为能够进行电位测量。

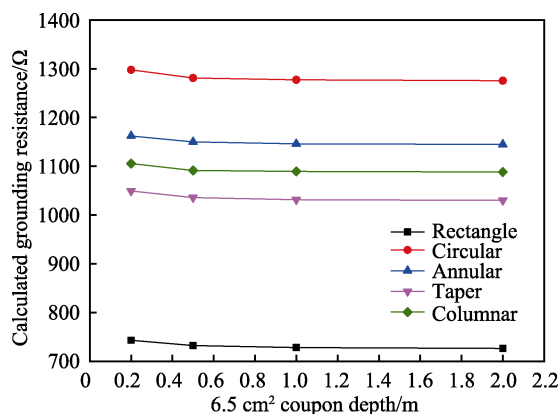


图 4 检查片埋深对接地电阻的影响
Fig.4 Effect of buried depth of coupon on grounding resistance

2.4 土壤电阻率的影响

计算 6.5 cm^2 棒状检查片在不同土壤电阻率中的接地电阻, 如图 5。在均匀土壤中, 接地电阻同土壤电阻率成正比关系。在埋设检查片附近浇水会使局

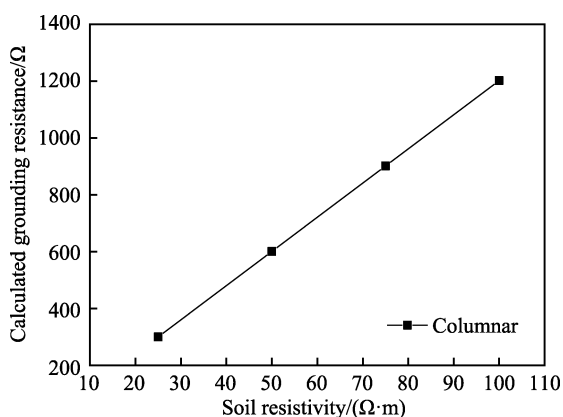


图 5 土壤电阻率对接地电阻的影响
Fig.5 Effect of soil resistivity on grounding resistance

部土壤电阻率发生变化。在土壤电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 的均匀土壤中, 假定浇水后, 局部土壤电阻率变为 $20 \Omega \cdot \text{m}$, 其土壤半径分别为 7.2、14.4、21.6、28.8 cm, 计算接地电阻得图 6。在检查片浇水后可以减少检查片接地电阻, 在浇水半径为 7.2、14.4、21.6、28.8 cm 时, 检查片的接地电阻分别降至 43.2%、29.0%、23%、21.6%。当浇水半径为 15 倍检查片等效圆半径时, 检查片接地电阻与检查片在 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 下的接地电阻相差 3%。由此可见, 浇水半径为 15 倍检查片等效圆半径时, 检查片的接地电阻已接近其在局部土壤电阻率下的接地电阻。

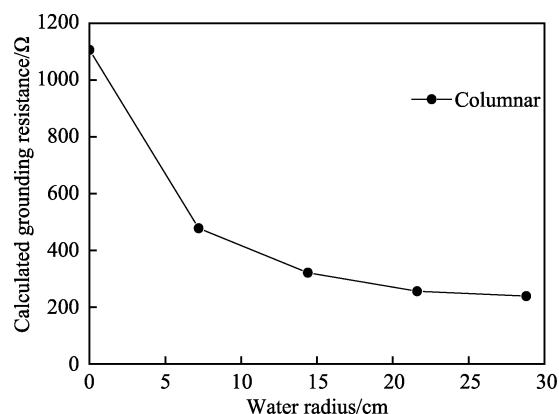


图 6 不同浇水量对接地电阻影响
Fig.6 Effect of different water quantity on grounding resistance

2.5 检查片接地电阻占比分析

检查片极化水平主要受接地电阻和极化电阻的影响。取管道周围土壤测得电阻率为 $66 \Omega \cdot \text{m}$, 测得的 X70 钢在土壤中的极化曲线如图 7。自然电位为 -638 mV 时, 计算得出在 -850 、 -1050 、 -1200 mV 下的极化电阻如图 8。由图可知, 极化电阻在 -1050 mV 下最大, 在 -1200 mV 下最小。

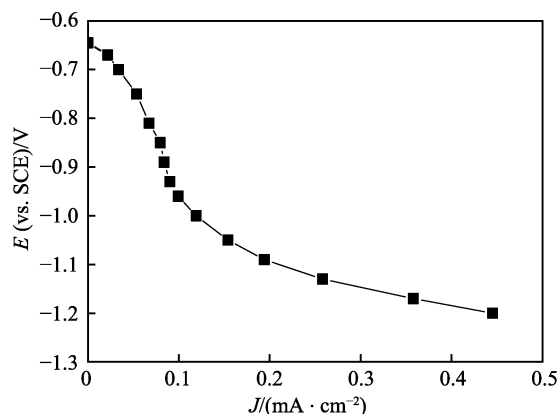


图 7 X70 钢在土壤中的极化曲线
Fig.7 Polarization curve of X70 steel in soil

在极化电位为 -850 mV 下, 随着检查片面积增

加,5种形状的接地电阻所占总电阻的比例一直增大。面积为 6.5 cm^2 的长方形检查片接地电阻所占总电阻比例最小,为66.2%,环状、棒状、锥状这3种形状下接地电阻所占比例接近,圆形检查片的接地电阻所占比例最大,为77.6%,如图9。在极化电位 -1050 mV 下,极化电阻为最大值,跟 -850 mV 时相接近,如图10所示。 6.5 cm^2 面积下5种形状检查片接地电阻占总电阻比例都很小,到 50 cm^2 面积时,检查片的接地电阻所占回路电阻比例就会越来越大。

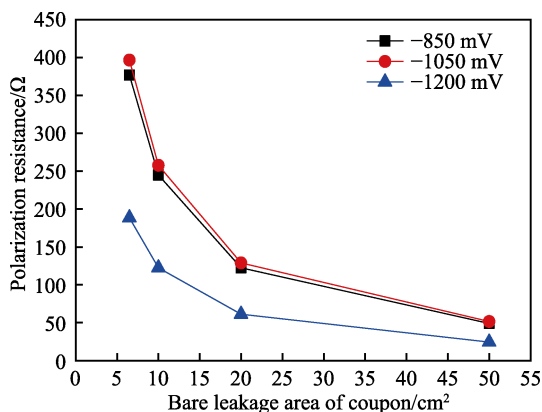


图8 X70钢在土壤中的极化电阻
Fig.8 Polarization resistance of X70 steel in soil

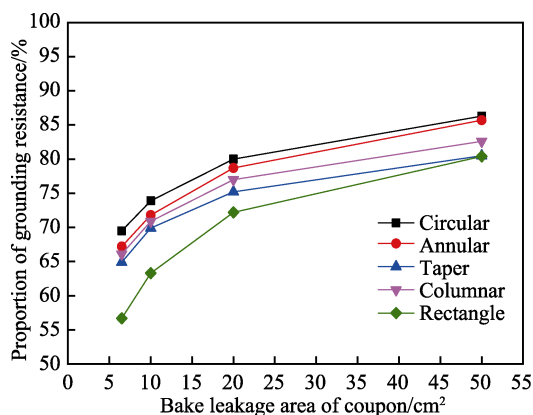


图9 -850 mV 下接地电阻占比
Fig.9 Proportion of grounding resistance at -850 mV

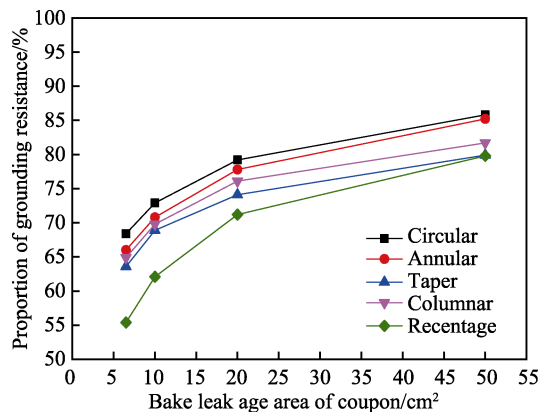


图10 -1050 mV 下接地电阻占比
Fig.10 Proportion of grounding resistance at -1050 mV

在极化电位 -1200 mV 下,极化电阻为最小值,检查片的接地电阻在回路电阻中占比最大(如图11)。在 6.5 cm^2 面积下,长方形检查片接地电阻占比最小,为79.8%,圆形检查片占比最多,为84.1%。在 50 cm^2 面积下,长方形检查片接地电阻占比最小,为92.7%,圆形检查片占比最多,为94.7%。

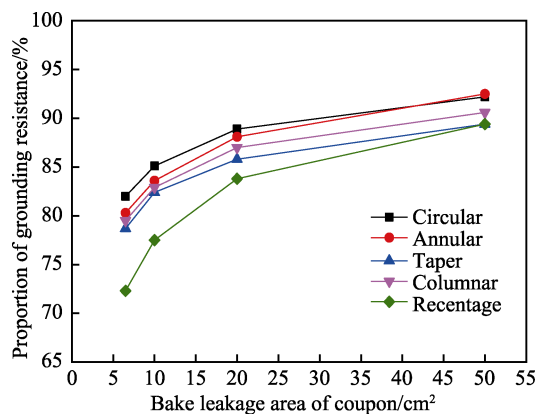


图11 -1200 mV 下接地电阻占比
Fig.11 Proportion of grounding resistance at -1200 mV

3 实验分析

3.1 土壤电阻率测试

本文通过 Wenner 四极法对室外土壤环境进行实地测试,测量设备为 VC4106 接地电阻测试仪,得出结果如表3。选取测量平均值(50.5 ± 0.02) $\Omega \cdot \text{m}$ 为计算值。

表3 土壤电阻率分布
Tab.3 Soil resistivity distribution

| Depth/m | Resistance/ Ω | Soil resistivity/($\Omega \cdot \text{m}$) |
|---------|----------------------|--|
| 0.1 | 82.2 | 51.6 |
| 0.2 | 40.7 | 51.1 |
| 0.3 | 26.4 | 49.7 |
| 0.5 | 15.9 | 50.2 |
| 1 | 7.92 | 49.8 |

3.2 检查片接地电阻测试

在测试过的土壤环境中,选取 6.5 cm^2 面积的5种形状检查片和4种不同面积的棒状检查片进行0.2 m和0.5 m埋深的接地电阻测试,检查片材质为X70钢,测量示意图如图12。电位极和电流极的引线长度设置为20 m和40 m,测量过程中,电位极沿接地体与电流极的连线移动,每次1 m,所得测量值如图13。取电位平稳区的电阻值作为测量值,测试结果如表4。

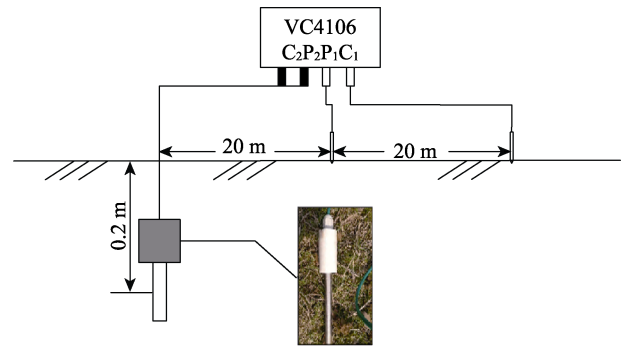


图 12 检查片接地电阻测量示意图
Fig.12 Resistance measurement diagram of coupons

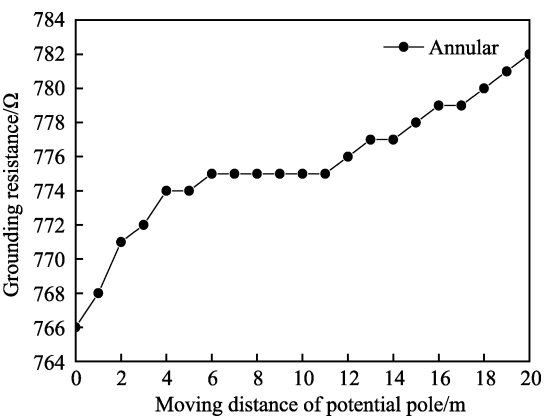


图 13 接地电阻测试结果
Fig.13 Tested grounding resistance

表 4 检查片的接地电阻
Tab.4 Grounding resistance of coupon

| Shape | Exposed area/cm ² | Shell area/cm ² | Depth/m | Grounding resistance/Ω |
|-----------|------------------------------|----------------------------|---------|------------------------|
| Rectangle | 6.5 | 80 | 0.2 | 502 |
| Circular | 6.5 | 80 | 0.2 | 857 |
| Annular | 6.5 | 80 | 0.2 | 775 |
| Taper | 6.5 | 80 | 0.2 | 729 |
| Columnnar | 6.5, 10, 20, 50 | 80 | 0.2 | 769, 573, 362, 197 |
| Rectangle | 6.5 | 80 | 0.5 | 497 |
| Circular | 6.5 | 80 | 0.5 | 849 |
| Annular | 6.5 | 80 | 0.5 | 770 |
| Taper | 6.5 | 80 | 0.5 | 720 |
| Columnnar | 6.5, 10, 20, 50 | 80 | 0.5 | 767, 570, 360, 193 |

3.3 数值模拟与实验结果对比

将实验测得的检查片的接地电阻按比例换算成数值模拟所选的 100 Ω·m 土壤电阻率下的接地电阻值。同数值模拟计算结果相对比，如表 5。从表中可以看出，实验值略高于计算值。0.2 m 埋深处，6.5 cm² 圆形检查片实验值比边界元模拟值大 1.4%，6.5 cm² 棒状检查片实验值比边界元模拟值大 6.3%；0.5 m 埋深处，6.5 cm² 圆形检查片实验值比边界元模拟值大 1.2%，6.5 cm² 棒状检查片实验值比边界元模拟值大 7.1%。边界元模拟结果和实验结果具有良好一致性。说明上述模型用于检查片接地电阻的计算是可行的。

表 5 检查片接地电阻计算值与实验值对比
Tab.5 Comparison between calculated and experimental values of grounding resistance of coupon

| Shape | Exposed area/cm ² | Depth/m | Experimental result/Ω | Simulation result/Ω | Error/% |
|-----------|------------------------------|---------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| Rectangle | 6.5 | 0.2 | 993 | 965 | 2.9 |
| Circular | 6.5 | 0.2 | 1696 | 1672 | 1.4 |
| Annular | 6.5 | 0.2 | 1535 | 1505 | 2.0 |
| Taper | 6.5 | 0.2 | 1443 | 1363 | 5.9 |
| Columnnar | 6.5, 10, 20, 50 | 0.2 | 1522, 1135, 717, 390 | 1432, 1103, 700, 374 | 6.3, 2.9, 2.4, 4.2 |
| Rectangle | 6.5 | 0.5 | 984 | 954 | 3.1 |
| Circular | 6.5 | 0.5 | 1681 | 1661 | 1.2 |
| Annular | 6.5 | 0.5 | 1525 | 1491 | 2.2 |
| Taper | 6.5 | 0.5 | 1426 | 1349 | 5.7 |
| Columnnar | 6.5, 10, 20, 50 | 0.5 | 1519, 1129, 713, 382 | 1418, 1092, 690, 366 | 7.1, 3.4, 3.3, 4.4 |

4 结论

建立了检查片的边界元模型，研究了检查片形状、裸露面积、壳体大小、埋深和土壤电阻率对检查片接地电阻的影响及规律，并结合实验验证了模型的合理性，得出如下结论：

1) 检查片裸露面积从 6.5 cm² 增加至 50 cm²，其接地电阻降低约 1/2。同一裸露面积下，圆形检查片

接地电阻最大，长方形的最小，两者相差 1.7 倍左右。随着面积从 6.5 cm² 增加到 50 cm²，同种形状的检查片的接地电阻最少降低 243%，最多降低 341%。5 种形状检查片的接地电阻从模拟结果中得出拟合公式，可以用来现场计算这 5 种形状检查片的接地电阻。

2) 加上绝缘壳体会增加检查片的接地电阻。当壳体面积为检查片 7 倍等效圆直径面积时，接地电阻变为没有壳体时的 1.36 倍，检查片接地电阻接近最大值。

3) 均匀土壤中，检查片从埋设 2 m 到 0.2 m 时，

接地电阻会增加 2%，可认为检查片埋设 0.2 m 时能够进行电位测量。

4) 均匀土壤中，接地电阻与土壤电阻率成正比关系，检查片附近土壤浇水会大幅减少检查片接地电阻值。当浇水半径为 15 倍检查片等效圆半径时，检查片的接地电阻已接近其在局部土壤电阻率下的接地电阻。

5) 检查片接地电阻在对地总电阻中占绝大比重，最大占比可达 94.7%，最小占比达 66.2%。

6) 检查片接地电阻的实验结果与有限元模拟结果具有良好的一致性，上述模型对于检查片接地电阻的计算是可行的。

参考文献:

- [1] 符耀庆, 王秀通, 陈胜利. 南朗段埋地天然气管道杂散电流检测与治理[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 22-27.
FU Yao-qing, WANG Xiu-tong, CHEN Sheng-li. Stray current detection and treatment for buried natural gas pipeline of Nanlangsegment[J]. Surface technology, 2016, 45(2): 22-27.
- [2] 查鑫堂, 张建文, 陈胜利, 等. 杂散电流干扰和阴极保护作用下碳钢腐蚀规律研究[J]. 表面技术, 2015, 44(12): 12-18.
ZHA Xin-tang, ZHANG Jian-wen, CHEN Sheng-li, et al. Corrosion behavior of carbon steel in interference of stray current and cathodic protection[J]. Surface technology, 2015, 44(12): 12-18.
- [3] ANGST U, BUCHLER M, MARTIN B, et al. Cathodic protection of soil buried steel pipelines a critical discussion of protection criteria and threshold values: Protection criteria for cathodic protection of steel pipelines[J]. Materials & corrosion, 2016, 67(11): 1135-1142.
- [4] 周勇, 王楠, 郭自新, 等. 绝缘防腐层缺陷对油气管线阴极保护中 IR 降的影响[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(9): 753-755.
ZHOU Yong, WANG Nan, GUO Zi-xin, et al. Effect of the damage area of coating on IR drop of cathodic protection for oil and gas pipeline[J]. Corrosion & protection, 2016, 37(9): 753-755.
- [5] NAEEM A K, SAUDI A. Use of CP coupons and soil corrosion probes in application of pipeline cathodic protection criteria[C]// Corrosion 2007. Houston: NACE, 2007: 11-15.
- [6] FRANK J A, JAMES R D. Field tests on an advanced cathodic protection coupons[C]// Corrosion 2005. Houston: NACE, 2005: 05039.
- [7] 李自力, 谢跃辉, 郝宏娜, 等. 试片断电法测量埋地管道的断电电位[J]. 材料保护, 2011, 44(12): 255-257.
LI Zi-li, XIE Yue-hui, HAO Hong-na, et al. Coupon electrical method for measuring the power-off potential of buried pipeline[J]. Journal of materials protection, 2011, 44(12): 255-257.
- [8] SY/T 0029—2012, 钢制检查片应用技术规范[S].
SY/T 0029—2012, Specification of application for underground steel coupons[S].
- [9] BSEN 50162—2004, Protection against corrosion by stray current from direct current systems[S].
- [10] NACE SP0775—2018, Preparation, installation, analysis, and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations[S].
- [11] 张丰, 齐晓忠, 金宏, 等. 试片断电法在管道阴极保护中的应用[J]. 油气储运, 2013, 32(7): 760-763.
ZHANG Feng, QI Xiao-zhong, JIN Hong, et al. Application of coupon off method in cathodic protection system of pipeline[J]. Oil & gas storage and transportation, 2013, 32(7): 760-763.
- [12] 张丰, 周兴涛, 王爱菊, 等. 试片断电法与管道阴极保护[J]. 管道技术与设备, 2014(3): 37-39.
ZHANG Feng, ZHOU Xing-tao, WANG Ai-ju, et al. Discussion about off potential of coupon and cathodic protection for pipeline[J]. Pipeline technology and equipment, 2014(3): 37-39.
- [13] 李民强, 郑震生, 董亮, 等. 海洋平台导管架外加电流阴极保护设计数值模拟[J]. 表面技术, 2016, 45(7): 109-114.
LI Min-qiang, ZHENG Zhen-sheng, DONG Liang, et al. Design problems in impressed current cathodic protection for offshore jackets based on numerical method jackets based on numerical method[J]. Surface technology, 2016, 45(7): 109-114.
- [14] ZHANG P, ZHAO J, WANG G. Numerical simulation of cathodic protection potential distribution of coastal power plant condenser based on physical scale model[J]. Applied mechanics & materials, 2014(644/650): 3734-3738.
- [15] HEUSSINGER C, BERTHIER L, BARRAT J L. Numerical simulation of cathodic protection on buried X80 steel[C]// International Conference on Natural Computation. Yantai: IEEE, 2010.
- [16] 董龙伟, 廖柯熹, 董斌, 等. 阴极保护数值计算中土壤电阻率的选取[J]. 材料保护, 2015, 48(10): 16-19.
DONG Long-wei, LIAO Ke-xi, DONG Bin, et al. Selection of soil resistivity in numerical calculation of cathodic protection[J]. Materials protection, 2015, 48(10): 16-19.
- [17] 郝宏娜, 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.
HAO Hong-na, LI Zi-li, WANG Tai-yuan, et al. Determination of boundary conditions for numerical simulation of cathodic protection[J]. Oil & gas storage and transportation, 2011, 30(7): 504-507.
- [18] 董亮, 杜艳霞, 张建宇, 等. 导管架牺牲阳极阴极保护数值模拟评价与优化改造[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(8): 754-758.
DONG Liang, DU Yan-xia, ZHANG Jian-yu, et al. Numerical simulation evaluation and optimal retrofit of sacrificial anode cathodic protection systems for offshore jackets[J]. Corrosion & protection, 2015, 36(8): 754-758.
- [19] JAIN A K, PERATTA C, BAYNHAM J M W, et al. Optimization of retrofit cathodic protection (CP) systems using computational modeling by evaluating performance of remnant and retrofit CP systems, taking into account long-term polarization effects[J]. Journal of endocrinology, 2011, 195(1): 179-186.
- [20] METWALLY I A, AL-MANDHAIL H M, NADIR Z, et al. Boundary element simulation of DC stray currents in oil industry due to cathodic protection interference[J]. European transactions on electrical power, 2013, 17(5): 486-499.