

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.01.021

交流供电地铁中锌带对埋地管道交流干扰的防护作用

陈霞¹, 崖尚松¹, 李易², 何治新¹, 龙意仁², 曹晓斌²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广州 510010; 2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 611756)

摘要: 针对交流供电系统通过空间的电磁耦合和大地的阻性耦合对邻近埋地管道产生交流干扰的问题, 以广州地铁 22 号线为例, 研究使用缠绕锌带来抑制管道交流干扰的方法, 搭建交流地铁线路与油气管道及锌带的仿真模型, 计算管道敷设锌带前后电磁感应电压、地耦合电位和涂层耐受电压, 研究锌带对交流干扰的防治效果, 并且通过对锌带的腐蚀量计算, 对其在交流干扰下的运行寿命进行分析。研究表明: 交流杂散电流腐蚀能力较弱, 交流干扰对于锌带的腐蚀量仅为每年 0.3%; 敷设锌带后的管道交流电流密度降幅可达 87.2%, 锌带对于管道交流干扰的抑制效果显著。

关键词: 地铁; 交流供电; 油气管道; 电磁干扰; 交流腐蚀

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)01-0141-07

Protective Effect of Zinc Strip in AC Power Supply Metro on AC Interference of Buried Pipelines

CHEN Xia¹, YA Shangsong¹, LI Yi², HE Zhixin¹, LONG Yiren², CAO Xiaobin²

(1. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756)

Abstract: With the rapid development of the economy, China's urban subway network has become more widely distributed. Owing to their limitations, traditional DC power supply systems are increasingly unable to meet existing and future needs. Therefore, AC power supply systems will be used in some urban express lines, such as Guangzhou Metro 22. The power supply system produces AC interference with adjacent buried pipelines through the electromagnetic coupling of space and resistive coupling of the earth. In engineering, winding zinc tape is often used to suppress the AC interference of pipelines. In this study, a simulation model of an AC metro line, oil and gas pipeline, and zinc strip was built, and the electromagnetic induction voltage, ground coupling potential, and coating withstand voltage before and after laying the zinc strip were calculated. The prevention effect of the zinc strip on AC interference was studied, and the operation life-span under AC interference was analyzed by calculating the corrosion of the zinc strip. The corrosion ability of the AC stray current was found to be relatively weak, the corrosion amount of AC interference to the zinc strip was only 0.3% per year, and the AC current density of the pipeline after the zinc tape was laid was reduced by 87.2%, revealing that the zinc tape has a significant suppression effect on the AC interference of the pipeline.

Keywords: subway; AC power; oil and gas pipelines; electromagnetic interference; AC corrosion

收稿日期: 2021-09-15 修回日期: 2022-01-26

第一作者: 陈霞, 女, 硕士, 高级工程师, 从事轨道交通领域供电系统研究, chenxia@gmdi.cn

基金项目: 四川省科技计划项目(2021YJ0311)

引用格式: 陈霞, 崖尚松, 李易, 等. 交流供电地铁中锌带对埋地管道交流干扰的防护作用[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(1): 141-147.

CHEN Xia, YA Shangsong, LI Yi, et al. Protective effect of zinc strip in AC power supply metro on AC interference of buried pipelines[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 141-147.

近年来,随着我国城市建设的不断发展,城市地铁网分布越来越广,传统直流供电制式由于其自身局限性,越来越无法满足需求,因此新型城市轨道交通将采用交流供电制式。城市中油气管道与交流城轨邻近或交叉不可避免,致使交流城轨的回流系统对邻近的埋地金属管道产生电磁干扰影响的可能性和危险程度不断增加,最明显的危害就是会腐蚀地下金属结构^[1-3]。城市轨道交通的供电系统可以通过空间的电磁耦合和大地的阻性耦合对邻近埋地管道产生交流干扰,在对地杂散电流以及空间电磁耦合的影响下,金属管道周边会产生感应电位,并且在变电站周边金属管道发生阳极反应,出现电解腐蚀情况^[4-5]。当城市轨道交通的牵引供电回路发生短路故障或者遭受破坏时,金属管道上产生的瞬态高感应电压甚至可能会击穿金属管道的外绝缘层,对工作人员的人身安全造成威胁。

针对电磁干扰下的金属腐蚀规律,国内外的研究主要集中在交流、直流对金属的腐蚀规律分析上,交流腐蚀与直流腐蚀存在很大的差异。直流腐蚀遵循法拉第电解定律,其干扰程度通常只与干扰强度(电压、电流)有关,可以通过法拉第电解公式计算金属损失的质量^[6-8]。但是金属在受到交流干扰后,由于交流电流方向周期变化,相当一部分交流电流并没有参与极化,电流的大小和金属损失的质量不再对应,交流腐蚀程度通常按照直流腐蚀的1%计算^[9]。但是在1975年中科院福建物质结构研究所二部的实验研究报告指出,当电流密度为 $3\sim 5\text{ mA/cm}^2$ 时,其腐蚀程度分别为自然腐蚀的 $2\sim 5$ 倍,交流腐蚀已不容忽视^[10]。如西南地区某管线与重庆市地铁1号线和地铁6号线等多条城市轨道交通线路平行,产生的电磁干扰导致130 km左右的管道受干扰电流的影响,强制电流阴极保护的恒电位仪无法正常输出,加速了管道的腐蚀^[11]。

学者们对于直流城轨与油气管道之间的影响做了大量研究,但关于交流城轨对油气管道的影响研究较少。曹方圆等^[12]以矩量法和电路理论为基础,建立了管道的电路模型与计算方法,通过将模型获得的计算结果与Cdegs计算结果及实测结果进行对比,验证了该模型的正确性,并分析几种管道保护措施对管道管地电位的影响。白锋等^[13]从电磁影响干扰源和影响对象入手,给出了可用于工程设计的计算分析方法,并利用Cdegs软件对某特高压交流输电线路与特高压直流输电线路并行架设且有管道交叉接近的工程实例进

行了仿真分析。为了掌握交流城轨系统对邻近沿线管道的腐蚀危害影响,探究油气管道表面敷设锌带对于防治城市轨道交通干扰的效果,本文以受到广州地铁22号线交流干扰的某段油气管道为研究对象,构建了基于Cdegs软件的牵引供电系统对于埋地管道的阻性耦合和感性耦合交流干扰模型,分析了敷设锌带对交流干扰的防治效果。研究了油气管道敷设锌带对于防治交流干扰的影响因素,评估了锌带的运行寿命,为解决广州地铁22号线工程问题提供理论依据。

1 油气管道腐蚀电位产生机理与危害

线路之间通过大地耦合与通过空间电磁耦合是完全不同的两个过程,埋地的油气管线上敷设的锌带承受的电压是两种耦合的综合体现。

1.1 大地阻性耦合

不同于三相电力系统,电气化铁路牵引供电系统是一种单相工频含地不对称高压供电系统^[14],采用钢轨和大地作为回流路径,正常运行时就存在显著的地中电流。由于钢轨与大地之间依靠道床和绝缘垫片绝缘,同时随着大功率电力机车(含动车组)的上线运行,牵引负荷显著增大,这些都将造成钢轨泄漏电流增加,地中杂散电流增加^[15-16],导致大地阻性耦合交流干扰程度显著增大。

1.2 空间电磁场耦合

当输电线路中流过交流电流时,将在导线周围产生交变磁场,该磁场同时存在于空气和大地中。当埋地金属管道和输电线路接近时,交变磁场通过电磁感应,将在管道上产生纵向电动势。纵向电动势作用于管道与大地形成的回路,在管道外护套两侧产生电位差。然而,城市轨道交通供电系统不同于输电线路,列车通过接触网取流,牵引电流通过走行轨、回流线和大地进行回流^[17-19]。由于接触网与回流系统中的电流在外界中产生的磁场不能相互抵消,导致周边金属管道两侧存在磁场差,从而在管道上产生干扰电压。

2 仿真模型

2.1 模型搭建和材料参数设置

本文以图1所示的AC 25 kV刚性接触网供电,带回流线的直接供电方式的牵引供电系统为例进行研究,根据实际地铁线路隧道分为上下行两路,两条地铁线路水平间距为16 m,根据实际交流地铁线路与油气管道的位置关系,把油气管道分为4段,第I段与

地铁线路夹角为 45°，长度为 1 690 m；第 II 段与地铁线路夹角为 30°，长度为 360 m；第 III 段位于地铁线路正上方，与地铁线路并行，长度为 600 m；第 IV 段垂直于地铁线路，长度为 2 000 m。地铁隧道与油气管道相对位置关系如图 2 所示。基于 Cdegs 软件中的 Hifreq 模块搭建城轨交流供电系统对埋地金属管道电磁耦合交流干扰的仿真模型，如图 3 所示。

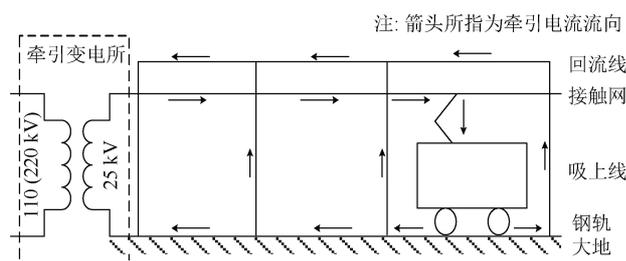


图 1 TR-NF 供电方式牵引供电系统结构
Figure 1 TR-NF power supply mode traction power supply system structure

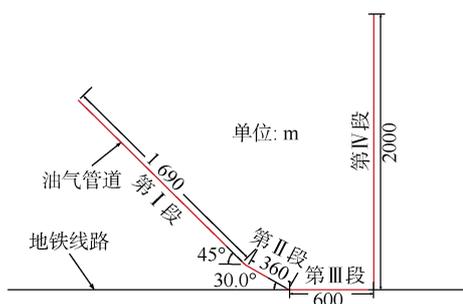


图 2 城轨交流供电系统与油气管道相对位置
Figure 2 The relative position of the urban rail AC power supply system and the oil and gas pipeline

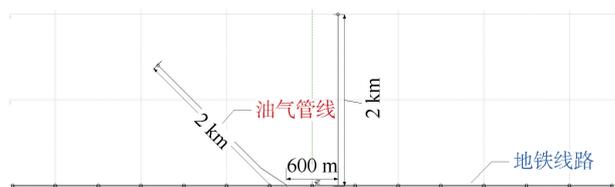


图 3 城轨交流供电系统与油气管道仿真模型
Figure 3 Urban rail AC power supply system and oil and gas pipeline simulation model

计算模型所需参数为：城市轨道交通与埋地油气管道的近距离伴行段为 3 358 m，并行长度为 600 m；采用 60 kg/m 标准钢轨^[20]；油气管道表面采用高防护的 3PE 涂层，并且为防护穿越段套管内透水引起管道的腐蚀，在油气管道上安装盘绕式锌带，均匀缠绕于管道防腐涂层，如图 4 所示，设置锌带截面积规格为 15.88 mm×22.22 mm。仿真中，由于 Cdegs 软件无法设置曲线导体，

故将锌带等效为与管道平行的长直导体，并在首尾处进行电气连接，管道与锌带导体中心间距 0.4 m，锌带相对电阻率设为 3.42。油气管道参数如表 1 所示。

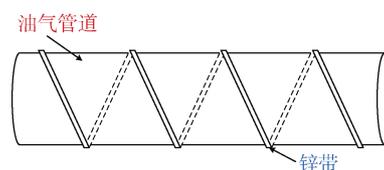


图 4 锌带布置示意
Figure 4 Schematic diagram of zinc strip layout

表 1 油气管道参数
Table 1 Oil and gas pipeline parameters

参数	数值
管道埋深/m	1.7
管径/mm	610
壁厚/mm	15.9
涂层厚度/mm	3
涂层电阻率/(Ω·m)	10 ⁵
管道相对电阻率	9.86
管道相对磁导率	300

地铁的远期发展规划为早高峰 24 对列车，实际运行时上下行最大电流有效值为 627 A，仿真中以此有效值进行计算。

2.2 评估标准所用计算条件确立

交流腐蚀发生的可能性与金属管道防腐层破损点的电流密度及管道与外界的电流流动相关联，本文基于《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》(GB/T 50698—2011)^[4]，计算埋地油气管道上交流电流密度，计算公式为

$$J_{AC} = \frac{8U}{\rho nd} \quad (1)$$

式中： J_{AC} 为评估的交流电流密度，A/m²； U 为交流干扰电压的有效值的平均值，V； ρ 为土壤电阻率，Ω·m； d 为破损点直径，m，通常破损面积按 100 m² 计算，对应的 $d=0.0113$ m。管道受到交流干扰的程度可按表 2 给出的判断指标判定。

表 2 交流干扰的判断指标
Table 2 Judgment index of AC interference

交流电流密度/(A/m ²)	交流干扰程度
<30	弱
30~100	中
>30	强

3 锌带对交流干扰的防治效果

3.1 锌带对交流干扰的抑制原理

当地铁供电系统通过空间电磁耦合在油气管道上产生感应电压时，由于锌带缠绕于管道表面，锌带上会产生与管道相位相同的感应电压，如图 5 所示，从而与管道感应电压相互抵消，进而降低管道涂层承受电压。

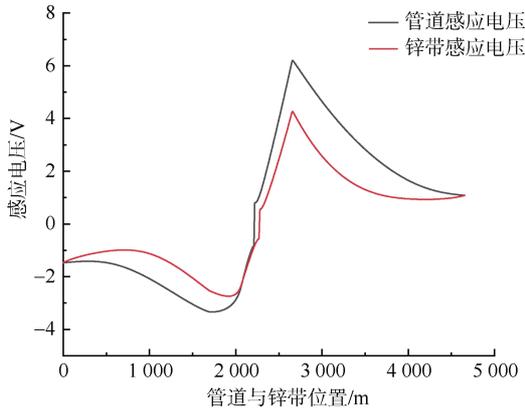


图 5 管道与锌带感应电位分布

Figure 5 Distribution of induced potential between pipeline and zinc strip

3.2 敷设锌带前后的管道感应电位

敷设锌带前后的管道感应电位分布如图 6 所示，感应电压在管道首尾段取得最大值，敷设锌带后管道的感应电压明显降低，管道首端(首末端按图中从左到右定义)感应电压幅值由 10.9 V 降低至 1.4 V，降幅约为 87.2%，尾端感应电压幅值由 8.5 V 降至 1.1 V，降幅约为 87.1%，最大感应电压出现在垂直段首端(油气管道与地铁线路空间上垂直的部分，距离左端首段约 2 650 m 处)，为 6.205 V。

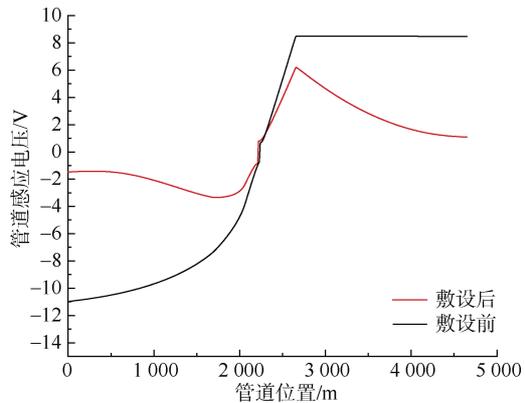


图 6 敷设锌带前后的管道感应电位分布

Figure 6 The induced potential distribution of the pipeline before and after laying the zinc stripe

3.3 敷设锌带前后的管道地电位

敷设锌带前后的管道地电位如图 7 所示，敷设锌带后，管道附近地电位明显上升，这是由于本身管道涂层起到了绝缘作用，管道泄漏电流极小，管道附近地电位变化不大，而锌带在产生同相电压降低管道感应电压的同时，也产生了泄漏电流，引起管道附近地电位抬升。

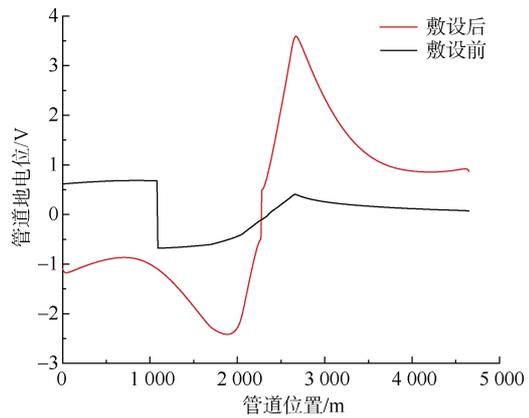


图 7 敷设锌带前后的管道地电位分布

Figure 7 The pipeline ground potential distribution before and after laying the zinc stripe

3.4 敷设锌带前后的管道涂层承受电压

交流腐蚀往往从管道的绝缘涂层开始，锌带对于交流干扰的防治效果主要体现在对管道涂层承受电压的影响^[21]。敷设锌带前后的管道涂层承受电压如图 8 所示，敷设锌带后管道涂层的承受电压明显降低，敷设锌带前管道涂层承受电压与感应电压波形相似，在管道首尾段取得最大值，敷设锌带后，首端涂层承受电压幅值由 11 V 降至 0.4 V，降幅为 96.4%，尾端

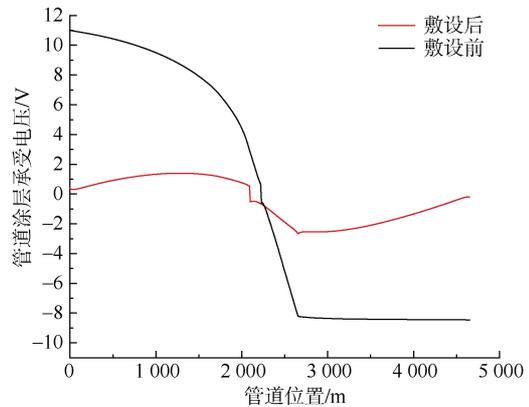


图 8 敷设锌带前后的管道涂层承受电压分布

Figure 8 Distribution of withstand voltage of pipeline coating before and after laying zinc stripe

涂层承受电压幅值由 8.5 V 降至 0.2 V, 降幅为 97.6%, 敷设锌带后的管道涂层承受电压最大值出现在垂直段首端, 为 2.668 V。

3.5 锌带防治交流干扰的影响因素

下面讨论地铁与管道并行段长度以及土壤电阻率对于锌带防治交流干扰效果的影响。

3.5.1 地铁与管道并行段长度

不同并行段长度 l 下的管道涂层承受电压分布如图 9 所示, 随着地铁与管道并行段长度增加, 管道涂层承受电压的幅值出现明显的上升趋势。

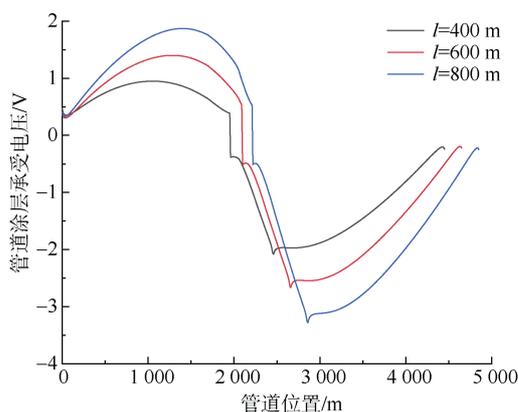


图 9 不同并行段长度下的管道涂层承受电压分布

Figure 9 Pipeline coating withstand voltage distribution with different parallel section lengths

3.5.2 土壤电阻率

不同土壤电阻率 ρ 下的管道涂层承受电压分布如图 10 所示, 随着土壤电阻率从 $15 \Omega \cdot \text{m}$ 上升至 $45 \Omega \cdot \text{m}$, 管道涂层承受电压的最大幅值呈现出微小的下降趋势。

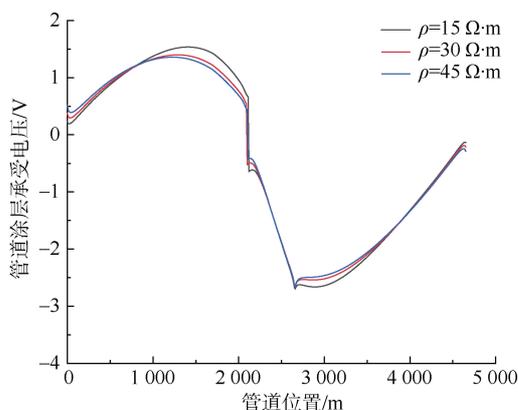


图 10 不同土壤电阻率下的管道涂层承受电压分布

Figure 10 Distribution of pipeline coating withstand voltage with different soil resistivity

3.6 锌带在防治交流干扰中的效果评估

本文通过 Cdegs 软件仿真搭建地铁线路与油气管

道电磁耦合模型, 对比敷设锌带前后的仿真计算结果, 可以确定锌带对于油气管道的交流干扰防治有明显效果, 管道感应电压最大幅值的降幅达到 87%, 管道涂层承受的电压最大幅值的降幅达到 96%。

利用式(1)计算埋地油气管道敷设锌带前后的交流电流密度如图 11 所示, 当交流电流密度小于 30 A/m^2 , 判定其交流干扰程度为弱, 敷设锌带后, 管道交流电流密度明显减弱, 管道首端降幅可达 87.2%, 但管道第 IV 段(分段方法见图 2)首端附近仍受到中等强度干扰, 后续可考虑增设其他防护措施进一步降低干扰。

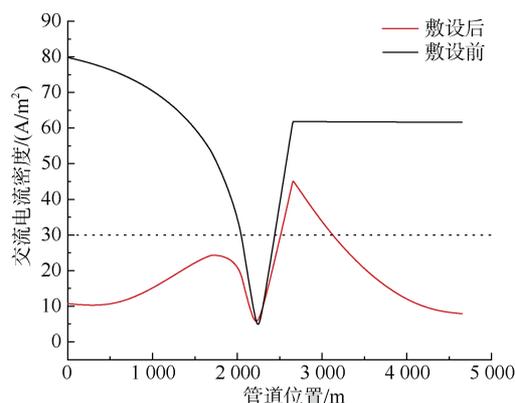


图 11 敷设锌带前后的管道交流电流密度

Figure 11 AC current density of the pipeline before and after the zinc strip was laid

影响因素方面, 地铁线路与管道并行段的长度与交流干扰强度呈正相关, 土壤电阻率对于交流干扰强度的影响相对较小, 需进一步讨论。

4 锌带运行寿命分析

由于腐蚀由长期工作电流所决定, 因此仿真中地铁按最不利情况, 即全年 365 d, 24 h 均工作于早高峰 24 对列车, 上下行最大电流有效值 627 A 进行仿真计算, 以评估锌带运行寿命。

4.1 锌带感应电位

锌带感应电位如图 12 所示, 最大感应电约为 4.271 V, 仍然出现在第 V 段油气管道的首端, 第 III 段的中端附近电压约为 0.549 V, 整条锌带的感应电压差达到 3.722 V。

4.2 锌带对地泄露电流

锌带单位面积泄露电流密度分布如图 13 所示, 单位面积泄露电流密度最大值为 0.621 A/m^2 , 此数据将用于锌带腐蚀量的计算。

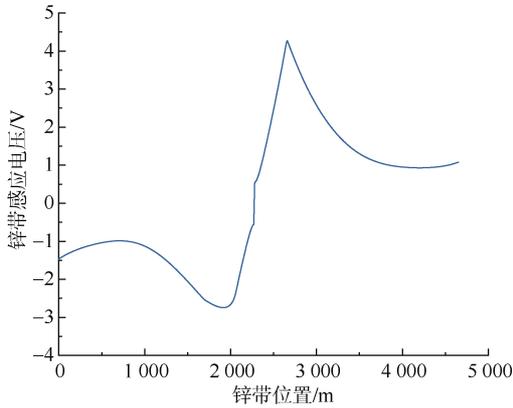


图12 锌带感应电位分布

Figure 12 Zinc stripe-induced potential distribution

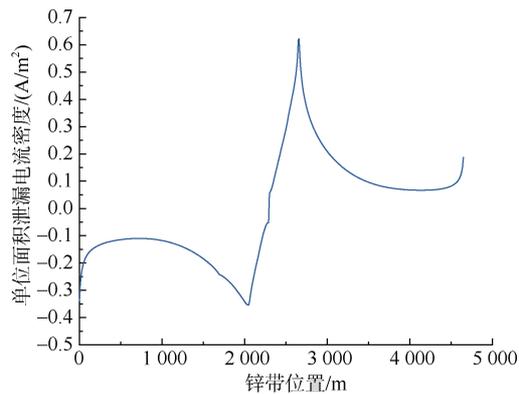


图13 锌带单位面积泄漏电流密度分布

Figure 13 Leakage current density distribution per unit area of zinc strip

4.3 锌带交流腐蚀量计算

根据文献[22],交流腐蚀量按直流腐蚀量的1%计算。直流腐蚀量在电流作用下的强直流干扰腐蚀量可以根据 Faraday 电解第一定律计算。

$$\Delta w = \frac{M}{nF} Q = kI\Delta t \quad (2)$$

$$k = \frac{M}{nF} \quad (3)$$

式中: Δw 为金属在时间 Δt 内的腐蚀量, kg; Q 为时间 Δt 内流过金属的电量, C; F 为 Faraday 常数, $1F=96485C$; n 为金属在氧化过程中失去的价电子数; k 为金属的化学当量, $kg/(A \cdot s)$ 。其中 M 为金属的摩尔质量, kg/mol ; I 为流出阳极金属的电流, A; 常见金属中, $k_{铁}=2.89 \times 10^{-7} kg/(A \cdot s)$; $k_{铝}=10.63 \times 10^{-7} kg/(A \cdot s)$; $k_{锌}=5.58 \times 10^{-7} kg/(A \cdot s)$ 。

式(2)可以对直流杂散电流的腐蚀危害作一个估计,结合《埋地钢质管道阴极保护技术规范》(GB/T21448—2017) [23]中给出的参考值,在自然条件

下,1A 的电流1年内能腐蚀掉8~10 kg 钢铁、17.6 kg 锌或33.5 kg 铅。

根据4.2节计算得到的锌带最大对地泄漏电流密度 $0.621 A/m^2$,按照直流腐蚀量的1%计算,5年锌带的腐蚀量为 $0.035 kg/m$ 。

4.4 交流干扰下锌带耐用寿命分析

锌的密度为 $7.14 g/cm^3$,锌带的规格为 $15.88 mm \times 22.22 mm$,即锌带质量为 $2.519 kg/m$,所以地铁线路每年只增加了锌带0.3%的腐蚀量,5年增加锌带质量损失1.5%。

计算得到最不利情况下(地铁每年365 d,24 h均以远期规划的早高峰方式运行),不同年限的锌带腐蚀量如表3所示。

表3 锌带不同年限的腐蚀量估算

Table 3 Estimation of the amount of corrosion of zinc stripes in different years

工作年限/a	腐蚀量/(kg/m)	腐蚀率/%
5	0.035	1.5
10	0.07	3
30	0.21	9

本文给出的是地铁线路交流干扰作用下,锌带增加的腐蚀量,未包括自然腐蚀、直流干扰腐蚀等其他干扰源的作用,以及阴极保护的防护效果。通过表3中数据可以看出,交流干扰本身对于锌带的腐蚀量在工程可接受范围内。

5 结论

1) 油气管道上的电压由电磁感应电压为主导,感应电压在管道首尾段取得最大值。敷设锌带后不仅降低了感应电压,还改变了管道沿线地电位,从而降低了管道上交流电流密度,降幅可达87.2%,极大地减少了交流电磁干扰对管道的影响。

2) 敷设锌带能够有效降低管道涂层的承受电压。在一定范围内,地铁与管道并行段长度与管道涂层承受电压幅值呈正相关,土壤电阻率与管道涂层承受电压的最大幅值呈负相关。

3) 锌带采用双端接地方式,锌带上的感应电压首末两端高,中间低;在交流情况下,锌带腐蚀量可取在直流下计算值的1%,锌带最大对地泄漏电流密度为 $0.621 A/m^2$,根据直流腐蚀量的1%计算,5年锌带的腐蚀量为 $0.035 kg/m$,交流杂散电流腐蚀能力较弱。

参考文献

[1] 柯甜甜,方江敏,钱瑶虹,等.地铁杂散电流对埋地金

- 属管道阴极保护的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(3): 90-93.
- KE Tiantian, FANG Jiangmin, QIAN Yaohong, et al. Effect of metro stray current on cathode protection for buried metal pipelines[J]. Urban mass transit, 2017, 20(3): 90-93.
- [2] YU J G. The effects of earthing strategies on rail potential and stray currents in DC transit railways[C]//International conference on developments in mass transit systems. London, 1998: 303-309.
- [3] 尹可华, 唐明华, 熊祥健. 工频电场影响下的管道腐蚀[J]. 油田地面工程, 1982, 1(4): 54-62.
- YIN Kehua, TANG Minghua, XIONG Xiangjian. Corrosion of buried pipelines under effect of electrical field with industrial frequency[J]. Oil-gasfield surface engineering, 1982, 1(4): 54-62.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 埋地钢质管道交流干扰防护技术标准: GB/T 50698—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for AC interference mitigation of buried steel pipelines: GB/T 50698—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [5] OGUNSOLA A, MARISCOTTI A, SANDROLINI L. Estimation of stray current from a DC-electrified railway and impressed potential on a buried pipe[J]. IEEE transactions on power delivery, 2012, 27(4): 2238-2246.
- [6] YU J G, GOODMAN C J. Modelling of rail potential rise and leakage current in DC rail transit systems[C]//IEE colloquium on stray current effects of DC railways and tramways. London, 2012: 2/2/1-2/2/6.
- [7] ZHANG L J, PAN Y W, TAO G, et al. Study of effect and protection for corrosion on buried pipeline by AC interference[J]. Advanced materials research, 2012, 557/558/559: 1756-1763.
- [8] 张文艳, 傅江, 王小平. 地铁干扰对埋地管道的外腐蚀影响及风险评价方法研究[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(10): 110-117.
- ZHANG Wenyan, FU Jiang, WANG Xiaoping. Study on the influence of subway stray current interference on the external corrosion of buried pipelines and corrosion risk assessment method[J]. Oil-gas field surface engineering, 2019, 38(10): 110-117.
- [9] 王绍杰, 胡元潮, 赵文龙, 等. 短路故障下输电线路接地网对埋地管道的影响[J]. 油气储运, 2021, 40(1): 39-43.
- WANG Shaojie, HU Yuanchao, ZHAO Wenlong, et al. Effect of grounding grid of power transmission line on buried pipeline under short circuit fault[J]. Oil & gas storage and transportation, 2021, 40(1): 39-43.
- [10] 朱久国. 交流电气化铁路对埋地油气管道电磁干扰特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- ZHU Jiuguo. Research on electromagnetic interference characteristics of AC electrified railways to buried oil and gas pipelines[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [11] 杨楨, 葛非, 李鑫. 高压直流接地极对管道电磁干扰影响研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 81-88.
- YANG Zhen, GE Fei, LI Xin. Study on interference effect of HVDC grounding electrode on electromagnetic valve in pipeline[J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2020, 34(7): 81-88.
- [12] 曹方圆, 孟晓波, 廖永力, 等. 直流接地极对埋地金属管道影响的电路模型及应用[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3258-3265.
- CAO Fangyuan, MENG Xiaobo, LIAO Yongli, et al. Circuit model and application for influence of DC ground electrode on buried metal pipelines[J]. Power system technology, 2016, 40(10): 3258-3265.
- [13] 白锋, 陆家榆, 林珊珊, 等. 特高压交直流输电线路同走廊正常运行时对邻近埋地油气管道的电磁影响分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3609-3614.
- BAI Feng, LU Jiayu, LIN Shanshan, et al. Analysis of electromagnetic effect of UHV AC and DC transmission lines in same corridor in normal operation on adjacent petroleum & gas pipelines[J]. Power system technology, 2016, 40(11): 3609-3614.
- [14] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [15] 盛望群. 基于 CDEGS 的交流电气化铁路对沿线油气管道电磁干扰影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 2101-2108.
- SHENG Wangqun. Study on influence of AC electrified railway on electromagnetic interference of oil and gas pipelines along the line based on CDEGS[J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(8): 2101-2108.
- [16] 黄河, 孔静, 王亚运, 等. $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路对埋地油气管道的电磁影响仿真计算[J]. 绝缘材料, 2015, 48(8): 67-72.
- HUANG He, KONG Jing, WANG Yayun, et al. Simulation study of electromagnetic effects on underground oil/gas pipeline due to $\pm 500\text{ kV}$ DC transmission line[J]. Insulating materials, 2015, 48(8): 67-72.
- [17] LIU W, LI Q Z, CHEN M W. Study of the simulation of DC traction power supply system based on AC/DC unified Newton-Raphson method[C]//2009 International conference on sustainable power generation and supply. Nanjing, 2009: 1-4.
- [18] LEE C H, LU C J. Assessment of grounding schemes on rail potential and stray currents in a DC transit system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1941-1947.
- [19] 梁盼望, 杨力, 蒋少波. 交流线路对埋地输油气管道的干扰影响机理分析及防护措施[J]. 机电信息, 2020(24): 30-31.
- [20] CAI Y. Modelling and numerical solution of multibranch DC rail traction power systems[J]. IEE proceedings-electric power applications, 1995, 142(5): 323.
- [21] 董根生, 蒋剑, 相生荣, 等. 750kV 交流线路对多条油气管道的电磁影响研究[J]. 中国电业(技术版), 2015(10): 16-22.
- DONG Gensheng, JIANG Jian, XIANG Shengrong, et al. Study on electromagnetic influence of 750kV AC power transmission lines on gas/oil pipelines[J]. China electric power (technology edition), 2015(10): 16-22.
- [22] MCCOLLUM B, AHLBORN G H. The influence of frequency of alternating or infrequently reversed current on electrolytic corrosion[J]. Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1916, 35(3): 371-397.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 埋地钢质管道阴极保护技术规范: GB/T 21448—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification of cathodic protection for underground steel pipelines: GB/T 21448—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

(编辑: 王艳菊)