

# 管道杂散电流干扰及防腐层破损分析

包黄莉<sup>1</sup>, 汤彬坤<sup>1</sup>, 冯 阳<sup>1</sup>, 吴 涛<sup>2</sup>, 曾小康<sup>2</sup>, 钟剑锋<sup>2</sup>, 伏喜斌<sup>3</sup>, 黄学斌<sup>3</sup>, 钟舜聪<sup>2</sup>

(1. 厦门华润燃气有限公司, 厦门 361000; 2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108;  
3. 厦门市特种设备检验检测院, 厦门 361000)

**摘要:** 建立管道杂散电流模型, 研究杂散电流与地铁和变电所间距、土壤电阻率、地铁牵引电压以及走行轨和埋地管道间距之间的关系及其对防腐层破损管道的干扰规律。结果表明, 地铁与变电所间距的减小、地铁牵引电压的减小、土壤电阻率的增大、走行轨与埋地管道间距的增大均会减少杂散电流对管道的干扰。埋地管道杂散电流随着管道防腐层破损面积的增大而增大, 且变电所附近的破损点腐蚀比较严重。从防腐层破损时的管地电位分布图可以直观确定破损点的位置, 从而为管道防腐层破损点定位提供新的分析手段, 为钢制天然气管道潜在高危区域的判断提供理论支撑与指导, 同时能够为新建管道的地段选择提供理论依据。

**关键词:** 杂散电流; 埋地管道; 破损点; 有限元分析; 管地电位

中图分类号: U223.6+2; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2023)05-0001-05

## Analysis of pipeline stray current interference and corrosion protection coating damage

BAO Huangli<sup>1</sup>, TANG Binkun<sup>1</sup>, FENG Yang<sup>1</sup>, WU Tao<sup>2</sup>, ZENG Xiaokang<sup>2</sup>, ZHONG Jianfeng<sup>2</sup>,  
FU Xibin<sup>3</sup>, HUANG Xuebin<sup>3</sup>, ZHONG Shuncong<sup>2</sup>

(1. Xiamen China Resources Gas Co., Ltd., Xiamen 361000, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361000, China)

**Abstract:** A pipeline stray current model was established, and the relationship between stray current and the distance between metro and substation, soil resistivity, metro traction voltage and the distance between rail and buried pipeline, as well as its interference law to pipeline with damaged anticorrosive layer was studied. The results show that the interference of the stray current on the pipeline decreases with the decrease of the distance between the metro and the substation and the traction voltage of the metro, also decreases with the increase of the soil resistivity and the distance between the rail and the buried pipeline. The stray current of buried pipelines increases as the damaged area of the pipeline coating increases, and the damaged pitting corrosion near the substation is more serious. The coating damage pipe-to-soil potential distribution can intuitively determine the location of damaged point. It provides a new positioning analysis method of pipeline anticorrosive coating damage point, and theoretical support and guidance for stray current on steel gas pipeline of potential high risk areas of judgment and as well as theoretical basis for the location selection for new pipelines.

**Key words:** stray current; buried pipeline; damaged point; finite element analysis; pipe-to-soil potential

收稿日期: 2022-09-03

基金项目: 厦门市市场监督管理局科技项目(XMSJ201913); 福建省市场监督管理局科技项目(FJMS2019044); 华润燃气 2019 年科技创新项目(KC2019007JT)

作者简介: 包黄莉(1989-), 女, 工程师, 主要从事燃气管道工艺管理, 燃气管道检验检测, 燃气安全运营管理等相关工作

通信作者: 钟舜聪(1976-), 特聘教授, 博导, 主要研究方向为智能传感与诊断, sczhong@fzu.edu.cn

近年来, 随着我国城市建设的迅速发展, 许多城市都建立了轨道交通系统并铺设了完整的埋地管道系统。地铁作为城市轨道交通的重要组成部分, 发展极为迅速<sup>[1-2]</sup>。地铁通过变电所供电, 供应电流将走行轨作为回流线, 大部分电流能够按照规定路线回流。由于技术、环境等因素的限制, 走行轨绝缘层无法做到完全绝缘, 故有小部分电流不可避免地泄

漏到土壤中,该部分不能按预设回路流回电流源的电流称为杂散电流<sup>[3]</sup>。地铁杂散电流对埋地管道的危害极大,有资料显示,北京地铁运营数年后,其隧道内的水管遭到严重腐蚀。调查研究后发现,腐蚀原因为存在杂散电流<sup>[4]</sup>。上海地铁二号线运行区段的埋地管道同样受杂散电流干扰,发生数次腐蚀泄漏事故,造成极大损失<sup>[5]</sup>。美国、英国等国家也遭受到地铁杂散电流的困扰<sup>[6-9]</sup>。

国内外学者对杂散电流进行了大量研究工作。蔡智超等<sup>[10]</sup>建立地铁运行状态下的杂散电流动态分布模型,分析了车辆在牵引、制动等条件下,钢轨对地电位和杂散电流的动态分布规律。ZABOLI等<sup>[11]</sup>通过 MATLAB/SIMULINK 和有限元仿真,比较了不同土壤模型下的杂散电流分布和杂散电流采集点的效率。朱峰等<sup>[12]</sup>讨论了不同过渡电阻及区间过渡电阻不均匀对杂散电流和走行轨电位的影响。曹方圆等<sup>[13]</sup>建立管道防腐和保护措施的接地极入地电流的电路模型,初步分析不同管道保护措施对管地电位的影响。董亮等<sup>[14]</sup>分析了地铁杂散电流对埋地管道阴极保护水平及牺牲阳极输出的影响规律,并提出相应的排流保护方法。姜志标等<sup>[15]</sup>分析了走行轨绝缘电阻破损情况下,机车行驶一个周期内的管道动态杂散电流分布,探讨了不同绝缘接头安装位置、不同牺牲阳极安装位置等条件下,杂散电流对管道的干扰程度。

管道受干扰的主要判别依据是管地电位,其能够反映出管道受干扰和腐蚀的特性<sup>[16-17]</sup>。利用有限元分析方法,通过改变地铁与变电所间距、埋地管道与走行轨间距、土壤电阻率大小、牵引电压大小、管道防腐层破损点位置以及破损面积等参数,模拟特定环境下埋地管道杂散电流的变化情况,通过防腐层破损时的管地电位分布来确定破损点的位置,为管道防腐层破损点定位提供技术参考。

## 1 模型建立和参数设定

应用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件,建立管道、走行轨和土壤几何简化模型(见图1)。考虑到实际埋地管道的长度较长,土壤环境较复杂,故将模型简化。设定走行轨是半径为 0.15 m,长为 100 m 的圆柱体,走行轨绝缘层厚度为 3 mm。土壤模型为 150 m×150 m×20 m(长×宽×高)的长方体,管道与走行轨位于土壤内,且走行轨平行放置于管道正上方,其间距为 5 m。管道

为半径 0.2 m、长 150 m 的圆柱体,管道绝缘层为厚 3 mm 的空心圆柱。

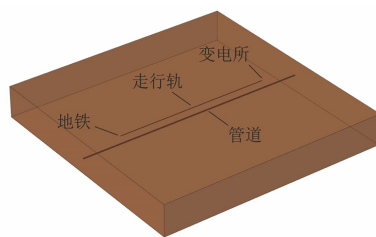


图1 管道、走行轨和土壤几何简化模型

为了更真实地模拟杂散电流分布,通过实地调查和研究,对管道、走行轨、走行轨绝缘层、管道绝缘层、土壤等参数进行定义,其中管道绝缘层电阻率根据标准 GB/T 19285—2014《埋地钢质管道腐蚀防护工程检验》定义为  $2 \times 10^6 \Omega \cdot m$ 。模型材料参数如表1所示。

表1 模型材料参数

材料	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$	介电常数
管道	$2.8 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^6$
走行轨	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^6$
走行轨绝缘层	1000	10
管道绝缘层	$2 \times 10^6$	1
土壤	50	15

考虑到杂散电流的实际回流情况以及模型简化,将地铁和变电所分别设置在走行轨左右端面。在土壤模型的6个表面施加-0.55 V 电压约束,模拟土壤自然电位;走行轨左右两端设置 10 V 和 -10 V 电压,模拟地铁供应电流的实际回流。为了对有限元仿真进行准确计算,有限元网格选择为自由四面体单元,由于管道较长,且绝缘层厚度较小,为避免低质量单元,定义最小单元长度为 1.5 mm,网格划分模型如图2所示。



图2 管道有限元网格划分模型

## 2 仿真结果分析

通过对模型参数的设定,可以模拟出地铁杂散电流分布情况。地铁杂散电流分布模型如图3所示,其中箭头表示电流流动方向,可见,地铁供应电流通过

走行轨回流, 杂散电流在供应电流回流的过程中泄漏到土壤, 最后再流回走行轨或直接流入变电所。

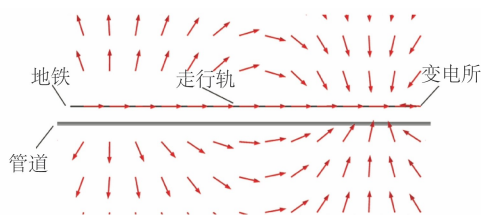


图3 地铁杂散电流分布模型

为了更好地研究杂散电流在管道周围的电场分布情况, 提取管壁电位值绘制沿管道长度方向的管地电位分布(见图4), 由图4可知, 管地电位相对土壤自然电位偏移量非常大, 管地电位处于负区间时, 相对土壤自然电位负向最大偏移值达 1.32 V; 电位处于正区间时, 相对土壤自然电位正向最大偏移值达 1.48 V, 已经远远超过我国国家标准规定的 0.1 V, 所以埋地管道存在严重的杂散电流干扰。

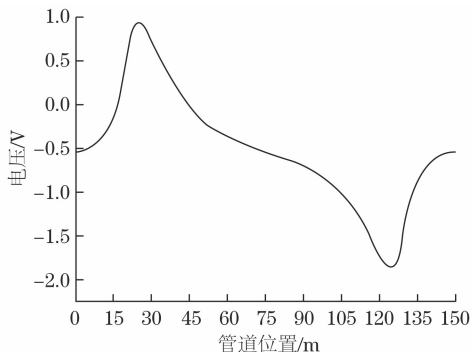


图4 管道长度方向的管地电位分布

因此, 在铺设埋地管道时, 应考虑地铁杂散电流对管道的影响<sup>[18]</sup>, 对已铺设在地铁附近的管道, 应制定合理的排流保护方案。通过改变地铁与变电所间距、埋地管道与走行轨间距、土壤电阻率大小、牵引电压大小、管道防腐层局部破损位置以及破损面积大小等参数, 继续模拟不同因素下杂散电流在管道中的电场分布。

### 2.1 地铁与变电所间距对杂散电流的影响

在模型及材料属性不变的基础上, 改变地铁与变电所间距, 并记录下地铁从 20 m 运行至 100 m, 每间隔 20 m 时管地电位的变化情况。图 5 为地铁与变电所间距对管地电位的影响曲线。

由图 5 可知, 当地铁运行至距变电所 20 m 时, 管地电位正区间相对土壤自然电位正向最大偏移值为 1.2 V, 负区间相对土壤自然电位负向最大偏移值为 1.02 V。当地铁运行至距变电所 100 m 时, 管地电位正区间相对土壤自然电位正向最大偏移值增

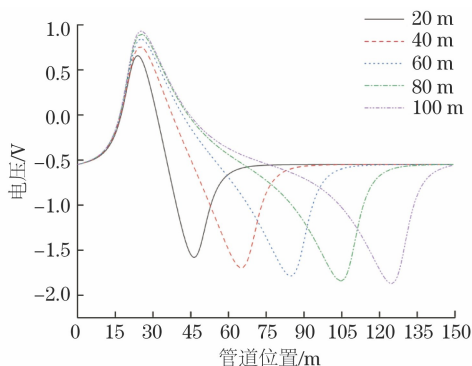


图5 地铁与变电所间距对管地电位的影响曲线

至 1.48 V, 管地电位负区间相对土壤自然电位负向最大偏移值增至 1.32 V。结果表明, 杂散电流大小与地铁和变电所间距关系密切, 且地铁与变电所间距和管地电位偏移量呈正相关, 即地铁运行时, 其与变电所距离越远, 地铁供应电流的回流路程则越长, 导致杂散电流泄漏量增大。所以, 管道铺设时应尽量减小埋地管道与走行轨的并行长度, 以减少杂散电流带来的干扰。

### 2.2 管道与走行轨间距对杂散电流的影响

在模型和材料属性不变的基础上, 改变管道埋深, 模拟管道与走行轨间距在 5~9 m 时的管地电位变化情况。图 6 为管道与走行轨间距对管地电位的影响曲线。

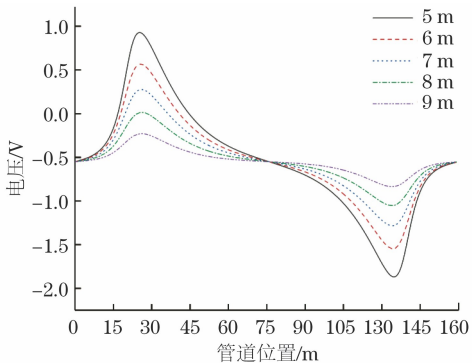


图6 管道与走行轨间距对管地电位的影响曲线

从图 6 可以看出, 当间距为 5 m 时, 管地电位负区间相对土壤自然电位负向最大偏移值为 1.32 V, 管地电位正区间相对土壤自然电位正向最大偏移值为 1.48 V。随着间距增大, 正、负向最大偏移值逐渐减小, 当间距为 9 m 时, 管地电位负区间相对土壤自然电位负向最大偏移值为 0.28 V, 正区间相对土壤自然电位正向最大偏移值为 0.32 V。结果表明, 管道与走行轨间距和管地电位偏移量呈负相关, 即管道与走行轨的间距越小, 杂散电流对管道的影响越大。



### 2.3 地铁牵引电压大小对杂散电流的影响

在模型和材料属性不变的基础上,改变走行轨左右两端面的电位差,模拟不同地铁牵引电压情况下的管地电位变化。图7为地铁牵引电压大小对管地电位的影响曲线。

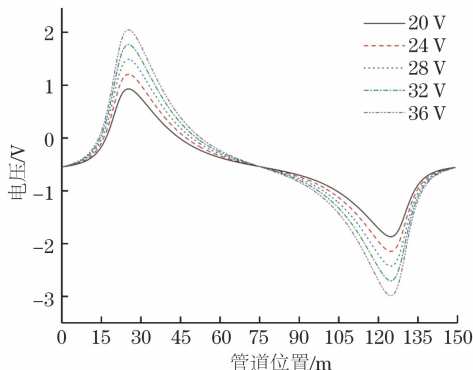


图7 地铁牵引电压大小对管地电位的影响曲线

从图7可知,当地铁牵引电压为20V时,管地电位相对土壤自然电位正向最大偏移值为1.48V,相对土壤自然电位负向最大偏移值为1.32V。当地铁牵引电压达到36V时,管地电位相对土壤自然电位正向最大偏移值高达2.6V,相对土壤自然电位负向最大偏移值高达2.44V。由此可见,随着地铁牵引电压的增大,管道管地电位相对土壤自然电位的偏移量也增大,即地铁牵引电压与管地电位偏移量呈正相关。

### 2.4 土壤电阻率大小对杂散电流的影响

在模型和材料参数不变的基础上,改变土壤电阻率的大小,模拟土壤电阻率变化对管地电位的影响,结果如图8所示。由图8可见,当土壤电阻率从 $50 \Omega \cdot m$ 增加至 $250 \Omega \cdot m$ 时,管地电位相对土壤自然电位正向最大偏移值从1.48V减小至0.92V,负向最大偏移值从1.32V减小至0.76V。因此,土壤电阻率大小对管地电位影响极大,其在递增过程中,杂散电流在土壤中的传导能力逐渐减弱,管地电位的偏移量不断减小。在铺设管道之前,应检测已选地段土壤电阻率的大小,从而做出更为合理的风险评估。

### 2.5 防腐层局部破损对管地电位的影响

一般来说,埋地管道防腐层完好时,杂散电流不会流入管道,此时杂散电流不会对管道造成腐蚀。但是管道防腐层在施工过程中容易损坏,防腐层使用时间过长亦会发生老化而导致防腐层出现局部破损。在此情况下,杂散电流会通过管道防腐层中的破损点进入管道,再从防腐层的另一个破损点处流出。

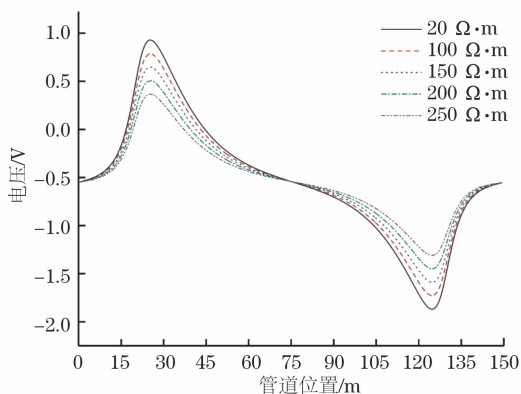


图8 土壤电阻率大小对管地电位的影响曲线

在模型和材料属性不变的基础上,在管道防腐层处设置两个半径为0.05m,相距50m的破损点,模拟管道防腐层出现局部破损时杂散电流的变化情况。图9为管道防腐层破损点有限元模拟图。

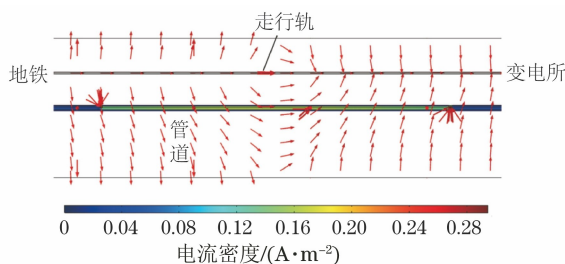


图9 管道防腐层破损点有限元模拟图

从图9可以看出,电流密度在两个破损点处以及两个破损点中间段的管道区域较大,这是因为杂散电流泄漏至管道时,从左侧破损点流入管道,再通过管道流入右侧破损点后流出,最后回流至变电所。电流密度在管道的其他部位均为零,说明在有防腐层的地方杂散电流未对管道造成干扰。

为了更直观地研究防腐层出现破损时杂散电流的分布情况,提取管壁电位值绘制沿管道长度方向的管地电位分布图(见图10)。

将图10与图4进行对比,图10中两个破损点位置处出现了管地电位突变,与周边再次形成电位差,其中靠近地铁的破损点位置处呈现电位负向突变,使得周边杂散电流流入该破损点;靠近变电所的破损点位置处呈现正向突变,使得管道内杂散电流流出该破损点。在杂散电流流出管道处会发生流失电子的氧化反应,造成电化学腐蚀,导致埋地管道发生腐蚀穿孔<sup>[19]</sup>。因此,应加强变电所下方埋地管道的监测,减少管道防腐层损坏。

#### 2.5.1 多破损点位置时的管地电位分布特性

在模型和材料参数不变的基础上,分别在管道45,60,90,105m处设置半径为0.05m的破损点,

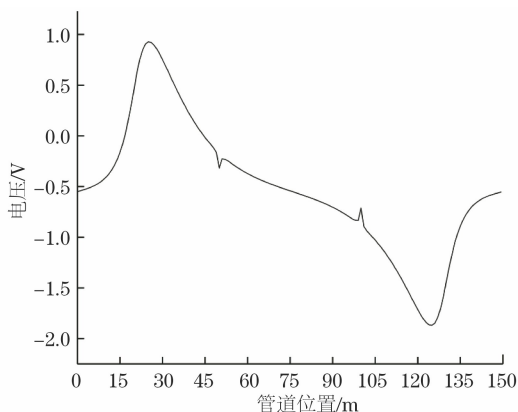


图 10 两个破损点时的管地电位分布

模拟多个防腐层破损点时的管地电位分布特性(见图 11)。

从图 11 可以看出,通过地铁杂散电流干扰下的管地电位分布图能够直观确定管道防腐层破损点的位置,且越靠近变电所的破损点处的电位正向突变值越大,越靠近地铁的破损点处的电位负向突变值越大。因此,当遭受地铁杂散电流干扰的管道防腐层出现多处破损时,工作人员通过检测管道沿线的电位波动,即可精确定位管道防腐层的破损点,避免大面积开挖。

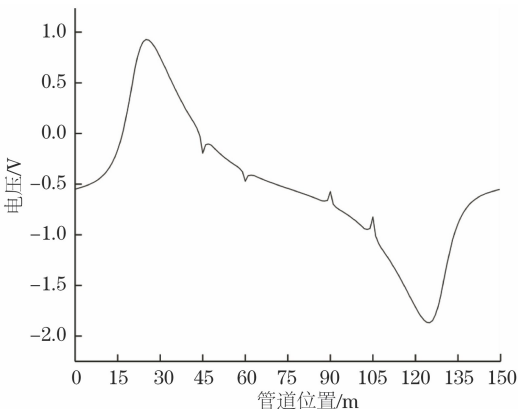


图 11 多破损点时的管地电位分布

### 2.5.2 不同防腐层破损面积时的管地电位分布特性

在模型和材料参数不变的基础上,改变防腐层破损点面积,模拟不同防腐层破损面积时的管地电位分布特性,结果如图 12 所示。

由图 12 可知,当破损点半径为 0.025 m 时,管道杂散电流流入点电位负向最大偏移值为 0.06 V,杂散电流流出点电位正向最大偏移值为 0.09 V;当破损点半径为 0.1 m 时,管道杂散电流流入点电位负向最大偏移值增至 0.26 V,杂散电流流出点电位正向最大偏移值增至 0.29 V。由此可见,随着防腐

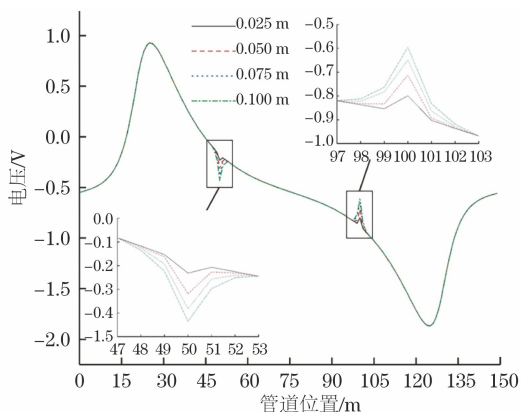


图 12 不同防腐层破损面积时的管地电位分布

层破损面积的增大,破损点处管地电位的突变越剧烈,同时受其影响的范围越广。

## 3 结论

建立管道杂散电流分布模型,研究杂散电流与地铁和变电所间距、走行轨和埋地管道间距、土壤电阻率以及地铁牵引电压之间的关系,并通过多点定位和防腐层破损面积变化来探究管地电位的分布特性。结果表明,地铁泄漏到管道周围的杂散电流随着走行轨回流电流路径增大而增大。当土壤电阻率增大,地铁牵引电压减小,走行轨和管道间距增大时,均会导致泄漏至管道的杂散电流减小。当管道绝缘层出现破损时,破损点处的管地电位会产生明显突变。破损点位置不同,管地电位的突变值以及突变点的位置也不同。随着防腐层破损面积的增大,管地电位的突变值越大,影响范围愈广。因此,可以根据管地电位分布情况来准确定位管道防腐层破损位置,并根据管地电位突变值来评估防腐层破损严重程度,为管道防腐层破损点定位和管道风险评估提供理论参考和技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 蔡力, 王建国, 樊亚东, 等. 地铁走行轨对地过渡电阻杂散电流分布的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3604-3610.
- [2] 赵昕, 顾保南. 2018 年中国城市轨道交通运营线路统计和分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(1): 1-7.
- [3] 吴昊, 王奎昌, 张文生, 等. 轻轨杂散电流对埋地煤气管线影响研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(6): 635-640.
- [4] 刘争, 李威力, 钟周全. 地铁杂散电流的危害及检测实例[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(9): 56-58.

(下转第 15 页)

of cracks in steel by means of supersonic waves—authors replies [J]. Journal of the Iron and Steel Institute, 1946, 153(1): 350-353.

[3] SANSALONE M, CARINO N J. Detecting delaminations in concrete slabs with and without overlays using the impact-echo method [J]. Journal of the American Concrete Institution, 1989, 86(2): 175-184.

[4] POPOVICS J S. Nondestructive evaluation; past, present, and future [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(3): 211.

[5] IN C W, ARNE K, KIM J Y, et al. Estimation of crack depth in concrete using diffuse ultrasound; validation in cracked concrete beams [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2017, 36(1): 4.

[6] ÇAM E, ORHAN S, LÜY M. An analysis of cracked beam structure using impact echo method [J]. NDT & E International, 2005, 38(5): 368-373.

[7] WON M C. Application of ultrasonic shear-wave tomography to identify horizontal crack or delamination in

concrete pavement and bridge [J]. Construction and Building Materials, 2016(121): 81-91.

[8] 童寿兴, 张晓燕, 金元. 超声波首波相位反转法检测混凝土裂缝深度 [J]. 建筑材料学报, 1998, 1(3): 287-290.

[9] 陈振富. 混凝土构件裂缝深度超声波检测中钢筋影响的判别 [J]. 无损检测, 2004, 26(2): 72-73, 76.

[10] 林维正, 苏勇, 洪有根. 混凝土裂缝深度超声波检测方法 [J]. 无损检测, 2001, 23(8): 323-326.

[11] 童年, 童寿兴. 超声波首波相位反转的机理解析 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19(4): 678-681.

[12] 苏忠高, 刘景熙, 林发明, 等. 基于超声波技术的水泥混凝土裂缝深度检测 [J]. 福建建设科技, 2019(6): 29-32.

[13] 商涛平, 童寿兴. 混凝土裂缝深度的超声波检测方法研究 [J]. 无损检测, 2002, 24(1): 6-8.

[14] 晏露超, 杨宏伟, 黎超群. 超声波单面平测法检测混凝土斜裂缝的研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(3): 156-159.



(上接第 5 页)

[5] 赵学芬, 姚安林, 赵忠刚. 二氧化碳腐蚀影响因素的层次分析法 [J]. 腐蚀与防护, 2006, (4): 191-193+207.

[6] 刘杰, 杜艳霞, 覃慧敏, 等. 地铁杂散电流对埋地管道的干扰规律 [J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(1): 43-47, 70.

[7] CHARALAMBOUS C A, AYLOTT P. Dynamic stray current evaluations on cut-and-cover sections of DC metro systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(8): 3530-3538.

[8] SOLGAARD A O S, CARSANA M, GEIKER M R, et al. Experimental observations of stray current effects on steel fibres embedded in mortar [J]. Corrosion Science, 2013, 74: 1-12.

[9] BERTOLINI L, CARSANA M, PEDEFERRI P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current [J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1056-1068.

[10] 蔡智超, 程浩, 林知明. 考虑地铁车辆牵引因素下杂散电流的规律研究 [J]. 电工电能新技术, 2018, 182(8): 85-91.

[11] ZABOLI A, VAHIDI B, YOUSEFI S, et al. Evaluation and control of stray current in DC-electrified railway systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 974-980.

[12] 朱峰, 李嘉成, 曾海波, 等. 城市轨道交通轨地过渡电阻对杂散电流分布特性的影响 [J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2738-2745.

[13] 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.

[14] 董亮, 姜子涛, 杜艳霞, 等. 地铁杂散电流对管道牺牲阳极的影响及防护 [J]. 石油学报, 2016, 37(1): 117-124.

[15] 娄志标, 秦朝葵, 夏沁, 等. 基于 Dymola 的燃气管道杂散电流防护模型 [J]. 油气储运, 2014, 33(9): 983-987, 991.

[16] 封琼, 张亚萍, 汪洋, 等. 基于埋地金属管道杂散电流的腐蚀与防护 [J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(2): 91-95.

[17] ZHANG Y P, FENG Q, HANA X, et al. Numerical modelling of buried pipelines under DC stray current corrosion [J]. Journal of Electrochemical Science and Engineering, 2019, 9(2): 125-134.

[18] 刘瑶, 谭松玲, 邢琳琳, 等. 北京埋地燃气管道地铁杂散电流干扰影响现场检测及规律分析 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(4): 429-435.

[19] 李琴, 陈奔, 黄志强, 等. 直流电车杂散电流对城市燃气管道电腐蚀的影响规律研究 [J]. 材料保护, 2019, 52(4): 66-72.