

核电混凝土裂缝深度的超声检测

袁林林¹, 刘卫东¹, 李 锴², 钟志民², 王东辉²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 国核电站运行服务技术有限公司, 上海 200233)

摘 要: 在混凝土中加入防辐射重晶石材料以模拟核电混凝土, 设计不同裂缝深度试件, 对不跨缝声学参数进行拟合, 得出相应试件的截距和声速, 利用超声波法首波反相确定相应测点的裂缝声学参数, 计算出实测的裂缝深度。在时距法基础上对深度为 40~80 mm 的裂缝进行计算, 分析得出设计裂缝深度与实测裂缝深度相应的误差范围。结果表明, 裂缝深度越深, 工况越复杂, 其误差越大; 首波反相方法具有较高准确性。

关键词: 裂缝深度; 超声检测; 核电混凝土; 首波反相

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2023)05-0011-05

Ultrasonic detection of crack depth of nuclear power concrete

YUAN Linlin¹, LIU Weidong¹, LI Kai², ZHONG Zhimin², WANG Donghui²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. China Nuclear Power Plant Operation Service Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: Anti-radiation barite material was added into concrete to simulate nuclear power concrete, and specimens with different crack depths were designed. The intercept and sound velocity of the corresponding specimens were obtained by fitting the acoustic parameters of non-crossing joints. The acoustic parameters of cracks at the corresponding measuring points were determined by the first wave inversion of ultrasonic method, and the measured crack depths were calculated. Based on the time interval method, the corresponding error range between the designed crack and the measured crack is obtained by calculating and analyzing the crack depth of 40—80 mm. The results indicate that the depth of crack is deeper, the error will be larger due to the complexity of working conditions. The first wave inversion method has high accuracy.

Key words: crack depth; ultrasonic testing; nuclear power concrete; first wave inversion

混凝土结构是工程建设中不可或缺的部分, 施工、养护和服役等阶段的不可抗因素会使得混凝土结构产生裂缝, 影响结构安全和使用寿命, 因此需对裂缝缺陷进行检测, 以对混凝土结构进行质量评估。混凝土裂缝检测方法通常有超声波检测法和冲击回波检测法^[1]。国外学者^[2-7]使用超声波法对混凝土进行检测且对混凝土裂缝深度进行研究; 国内学者研究了使用超声波相位反转检测混凝土构件裂缝深度、裂缝检测机理、裂缝检测方法等^[8-14]。

在混凝土结构裂缝检测中, 深度为 60~250 mm 的裂纹检测精度较高, 误差较小, 而深度小于 60 mm 的裂缝检测误差较大。因此试验根据核电混凝土的工况, 设计深度为 40~60 mm 和 60~80 mm 两个区间的裂缝, 在原有采用超声波时-距法检测裂缝深度的基础上, 研究核电混凝土中不同深度裂缝被检出的难易程度, 并对所设计的核电混凝土裂缝检测方法和误差进行进一步研究。

1 裂缝检测机理

超声波法检测核电混凝土试件时, 由于试件出现裂缝破坏了完整性, 发射换能器发出的超声波只能绕过裂缝到达接收换能器, 因此与正常混凝土试件相比, 其超声波波形的主频、波速、声时和波幅等

收稿日期: 2022-10-17
基金项目: 国家科技重大专项(2018ZX 06002008)
作者简介: 袁林林(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为无损检测
通信作者: 刘卫东, 研究方向为无损检测, wdliu2010@126.com

声学参数会发生改变,而通过分析声学参数的变化可得出裂缝深度。采用时-距法进行裂缝深度测量时,测距过大,超声波能量会衰减而影响波形分析;测距过小,波形会发生畸变而导致实测裂缝误差增大。因此测距选取为 50,100,150 mm,作为不跨缝回归曲线拟合求得截距和声速。

采用单面平测法布置换能器,其平面检测法分为不跨缝和跨缝声时测量。将换能器 T(发射换能器)、R(接收换能器)放置在裂缝的一侧,根据两个换能器 T,R 之间的内边距(内边距 $L_1=50\text{ mm}$, $L_2=100\text{ mm}$, $L_3=150\text{ mm}$, \cdots , L_i)读取声时(t_1 , t_2 , t_3 , \cdots , t_i),绘制出时-距图或者用回归曲线求出声时和测距之间的表达式

$$L_i=a+bt_i \tag{1}$$

式中: b 为斜率,即声速; a 为截距。

在测试过程中,每两个测点之间超声波传播的实际距离 l_i 为

$$l_i=|a|+L_i \tag{2}$$

此时,不跨缝的声速 v 为

$$v=\frac{L_i-L_1}{t_i-t_1} \text{ 或 } v=b \tag{3}$$

跨缝声时测量时,将换能器 T,R 分别放置在裂缝两侧,然后根据 T,R 之间的内边距读取声时,记作 t_i^0 ,同时要观察首波是否反相,发现首波相位变化时,取裂缝深度为该测距以及相邻两个测距所得裂缝深度的平均值,若难以观察到首波反相,则以不同测距按照式(4)计算,将测距 L_i 与 d_i 比较,取 $d_i<L_i<3d_i$,除此之外的数据剔除。

$$d_i=\frac{l_i}{2}\sqrt{\left(\frac{t_i^0v}{l_i}\right)^2-1} \tag{4}$$

$$h=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n d_i \tag{5}$$

式中: d_i 为每次检测得到的裂缝深度; h 为所测的裂缝深度平均值; n 为测点数。

跨缝裂缝超声检测原理如图 1 所示。

2 核电混凝土裂缝设计

2.1 仪器与试验材料

使用北京海创公司 HC-U81 型多功能超声波无损检测仪进行检测,其主要由主机、平面换能器和探测装置等部件组成。为模拟核电混凝土,在混凝土中加入重晶石(具有吸收 X 射线和防辐射功能),重晶石的主要成分是硫酸钡,摩氏硬度是 3.0~3.5,比重

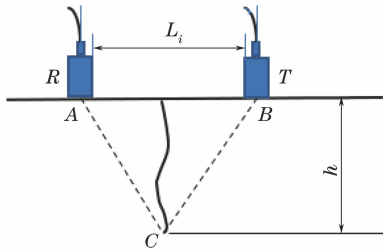


图 1 跨缝裂缝超声检测原理

为 4.0~4.6,堆积密度为 $1\,700\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,含泥量为 0.35%。试件设计密度为 $2\,800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,其实测堆积密度为 $2\,785\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,立方体抗压强度为 45.4 MPa,静弹性模量为 $3.9\times 10^4\text{ MPa}$,砂率为 0.35。其配合比为:水泥, $461.7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;水, $220.9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;重晶石, $684.1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;重晶砂, $368.4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;普通碎石, $700.4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;黄砂, $329.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2.2 裂缝设计

该试验设计 6 个混凝土试件 SP1~SP6,SP1~SP4 每个试件设置 4 条裂缝,SP5 和 SP6 各设置 5 条裂缝。设计裂缝深度为 40,45,50,55,60,70,80 mm。SP1 和 SP2 所设计的裂缝深度相同,但位置不同;SP3 和 SP4 裂缝深度相同,位置不同;SP5 和 SP6 试件尺寸与 SP1~SP4 尺寸不同,主要是为了验证试件尺寸对测试裂缝的影响。考虑实际构件中钢筋对检测的影响,每个试件均需加入钢筋笼,其混凝土保护层厚度为 20 mm,SP1~SP4 试件尺寸为 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高,下同);为模拟大体积混凝土,SP5 试件尺寸设计为 $1\,000\text{ mm}\times 1\,000\text{ mm}\times 800\text{ mm}$;SP6 试件尺寸为 $1\,000\text{ mm}\times 1\,000\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 。试件外观如图 2 所示。

2.3 试件裂缝数据采集

每个试件设置不同深度的裂缝,在进行不跨缝数据采集时,为减小试验误差,在试件表面选取一个较平整的面进行采集,所测数据经拟合处理得到的截距和声速作为每条裂缝共同的截距和声速。不跨缝数据采集时,根据超声波检测混凝土裂缝规范,测距设为 50,100,150 mm,增量设为 25 mm 和 50 mm。实际操作过程中,要进行零声时判别,在换能器上涂抹适量耦合剂,使 T、R 换能器的内边距符合所设置好的测距,保持波形稳定。跨缝数据采集过程为:在不同测距位置测取声学参数,同时观察显示屏上波形参数的变化,保证超声波的首波发生反相且波形趋于稳定时,保存所测数据,作为实测裂缝的声时值。

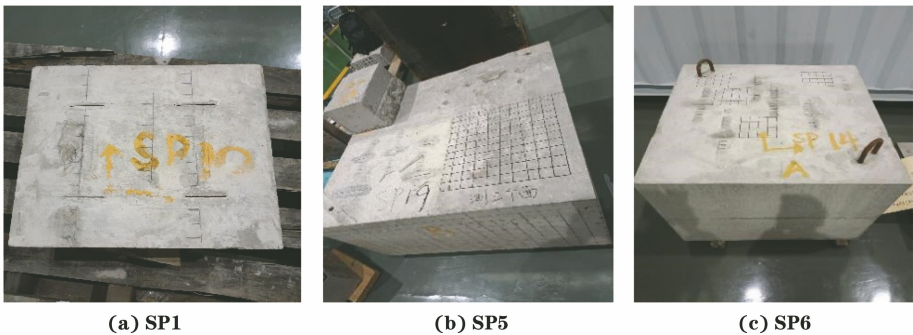


图 2 核电混凝土裂缝试件外观

3 裂缝深度计算及误差分析

在进行裂缝深度计算时,通过测点得到的声时并不是超声波越过试件裂缝的实际声时,为减小误差需将零声时去掉。根据 CECS21:2000 数学模型,超声波实际传播距离是由测点间距与不跨缝数据拟合所得截距绝对值之和,试件 SP1~SP4、SP5 和 SP6 根据不跨缝拟合(按相同标准)得到不同的截距和声速值,为减少仪器程序对数据的修正,通过该仪器的数据采集软件得到相应试件的声时值,然后采用 CECS21:2000 数学模型计算每条裂缝中每个测点的裂缝深度。试验利用 Origin 数据分析软件对不跨缝所得声时进行数据拟合得到每个试件的截距和声速,以计算每个试件中每条裂缝的实际缝深。试件 SP1 中,设计裂缝深度分别为 40,45,60,50 mm。不同测点测距为 50,100,150 mm,所对应的声时为

19,31,43.5 μs ;波幅为 118.10,103.17,104.98 dB;声速为 2.632,3.226,3.448 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。通过不跨缝声时和声速拟合可知截距 a 为 -29,斜率即声速为 4.26 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。以试件 SP1 中设计裂缝深度为 40 mm 为例,第一对测点测距为 50 mm,根据截距的绝对值可知超声波经过裂缝的距离为 79 mm;第二对测点测距为 100 mm,测距增量为 25 mm,可知超声波经裂缝的距离为 129 mm;第三对测点测距为 150 mm,测距增量为 50 mm,可知超声波经裂缝的距离为 179 mm;由超声波仪的测量软件可知 3 个测点的声时分别为 26.7,35.9,46.2 μs ,由上文公式可计算得相应的裂缝深度分别为 40.8,40.9,41.0 mm,其平均裂缝深度为 40.9 mm。由以上方法可得出试件 SP2~SP4、SP5 和 SP6 中每条裂缝的实测深度,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,超声波不跨缝检测时,由于混凝土

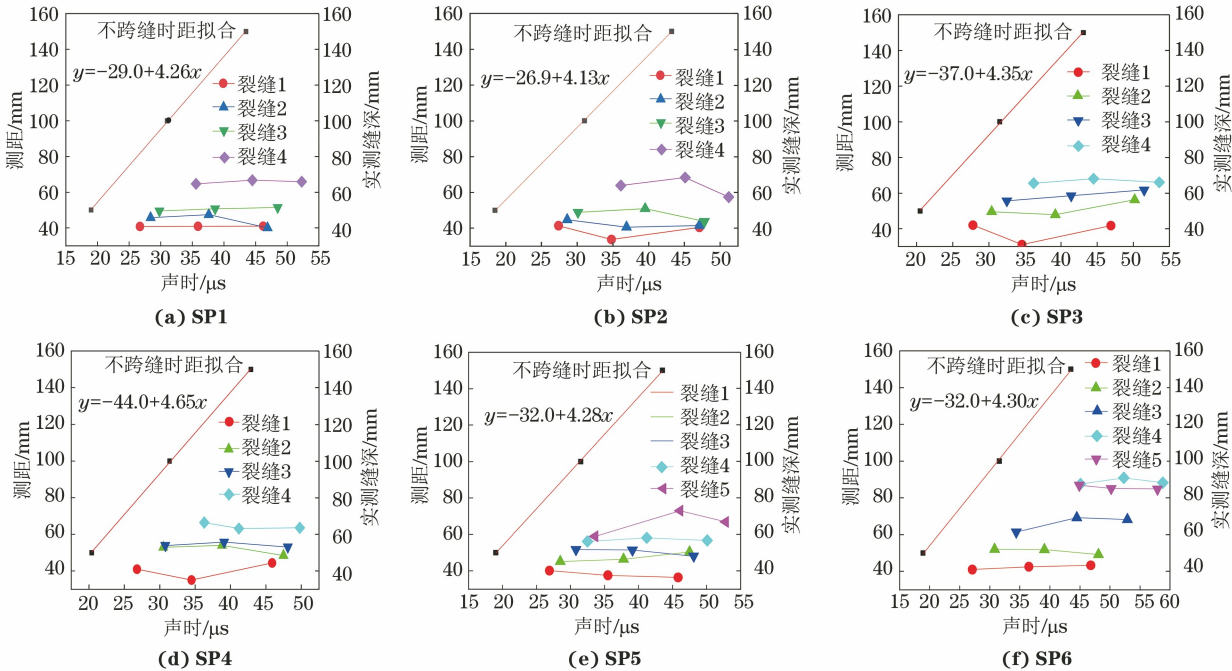


图 3 试件 SP1~SP6 裂缝的超声实测深度

中无缺陷,测距与声时呈线性关系;而在跨缝检测时,由于裂缝的存在,超声波绕过裂缝从而声时增加,测距与声时不呈线性关系。

根据 CECS21:2000 数学模型可得出每个测点对应的裂缝深度。通过测点计算出的裂缝深度,可得知试件中每条裂缝深度的平均值。SP1 所测 4 条缝深均值分别为 40.9,44.4,65.8,50.6 mm;SP2 所测 4 条缝深均值分别为 42.1,63.2,47.8,38.5 mm;SP3 所测 4 条缝深均值分别为 66.6,51.3,38.3,58.7 mm;SP4 所测 4 条缝深均值分别为 52.0,40.2,54.0,64.4 mm;SP5 所测 5 条缝深均值分别为 50.4,57.1,38.1,47.3,66.3 mm;SP6 所测 5 条缝深均值分别为 42.3,51.0,66.3,88.9,85.6 mm。根据试件裂缝的设计深度和实测深度可得知每条裂缝的误差情况,将其绘制成曲线,如图 4 所示(不同颜色表示不同裂缝)。

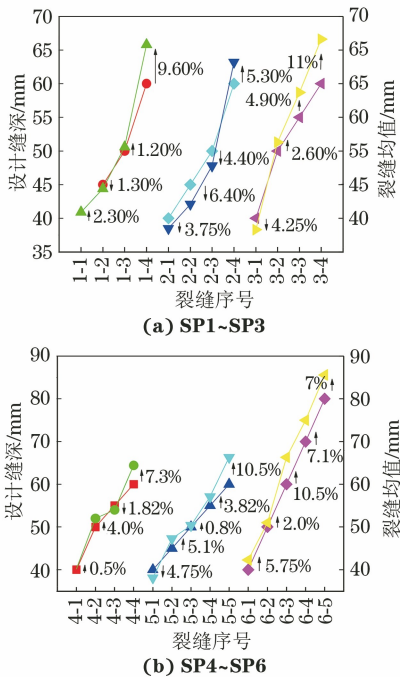


图 4 各试件缝深的误差曲线

由裂缝误差数据分析可知,设计深度为 40~50 mm 的裂缝中,误差最小为 0.5%,最大为 6.4%;设计深度为 50~60 mm 的裂缝中,误差最小为 0.8%,最大达 11%;设计深度为 60~80 mm 的裂缝中,最小误差为 5.3%,最大误差达 11.1%。由以上误差数据分析可知,在核电混凝土试件中,裂缝深度为 40~50 mm 时,超声实测裂缝深度总体小于设计裂缝深度;裂缝深度为 50~80 mm 时,超声实测裂缝深度总体大于设计裂缝深度;与 60~80 mm 深度相比较,裂缝深度为 40~60 mm 时的误差较小。由此可见,随着裂缝深度增大,其误差也会增大。

误差产生原因主要有以下 5 点:① 检测距离引起的误差,检测距离过大,超声波能量衰减,检测距离过小,波形发生畸变,两者都会影响波形分析,从而产生误差;② 裂缝深度造成的误差,裂缝深度过大,裂缝会向下四周延展,其复杂性增大,不可控因素过多,使得超声波在传播过程中声时过大而引起误差;③ 试验操作造成的误差,试件平整度、耦合剂涂抹均匀度和两个平面换能器所受压力大小都会导致波形首波变形,甚至出现丢波而造成误差;④ 试件质量问题导致的误差,超声波在试件中传播时,试件不密实、含缺陷时引起的超声波反射、散射等现象会造成声波衰减,首波波幅变小从而造成误差;⑤ 试验模拟核电混凝土与普通混凝土相比,前者对声波能量衰减更为突出,这也使得在裂缝深为 40~80 mm 时,裂缝深度越大,误差也增大。

4 结语

利用超声波检测所设计模拟核电混凝土试件裂缝,不跨缝测取声学参数,包括声时、波幅、波速等,按照测距 50,100,150,200,250 mm 等距离测取数据时,由于需要施加耦合剂、清理试件表面,为了减小误差,通常只选取一个较好的区域进行检测,得到单个试件的数据并拟合得到截距和波速,而不是每个裂缝重新测取一遍,且尽量多测几个测点进行拟合。

由所测数据分析可知,缝深深度为 40,45,50 mm 时,检测误差较小,其最小误差为 0.5%,最大误差为 6.4%;缝深为 50~80 mm 时,误差相比于设计深度不大于 50 mm 裂缝的要大得多,其最大误差已达到 11.1%,即裂缝深度较大时,缝深误差较大。由于试验设计的是模拟裂缝,与实际工程中的裂缝有一定区别,在实际应用过程中,需考虑裂缝缺陷的复杂性。

根据超声波波形图相位反转特性,使用其相近的两个测点作为计算平均实测缝深的测点,所得结果具有一定的准确性,且比使用三点法直接计算缝深更加准确。进行不跨缝拟合时,由于所得到的截距和波速是一个范围值,在选取截距和波速时需要一定的经验,在试验过程中,应按照同一个标准进行选择。

参考文献:

[1] 张小琼,王战军. 混凝土无损检测方法发展及应用[J]. 无损检测,2017,39(4):1-5.
[2] DESCH, SPROULE D O, DAWSON. The detection

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
的判辨 [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.