

# 城市燃气管道受动态交流干扰的影响规律及腐蚀风险分析

张玉星, 车明, 张诚, 李伟, 黄文尧, 覃慧敏, 邸鑫

(北京市燃气集团有限责任公司, 北京 100011)

**[摘要]** 针对超大城市燃气管网不同压力级制在不同铁路线路影响下的干扰情况、干扰规律及腐蚀规律,选取了近10处与电气化铁路交叉、并行管道的37个测试桩进行24 h数据监测与分析,明确了北京地区受动态交流杂散电流的干扰规律及风险情况。结果表明:北京地区次高压及以上燃气管网受电气化铁路干扰影响明显高于中低压管网;城市燃气管网牺牲阳极阴极保护系统一定程度上对杂散电流干扰具有一定的排流缓解及抗干扰功能;与电气化铁路并行管道的交流干扰大于交叉管道,且峰值与机车位置有关;对于动态交流干扰的腐蚀风险,建议通过交流电流密度区间所占比例与断电电位相结合的方式评价。

**[关键词]** 城市燃气; 电气化铁路; 动态交流; 干扰规律; 腐蚀风险

**[中图分类号]** TG172 **[文献标识码]** B **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2023.0026

**[文章编号]** 1001-1560(2023)01-0184-07

## Analysis on the Influencing Law and Corrosion Risk of City Gas Pipelines under Dynamic AC Interference

ZHANG Yu-xing, CHE Ming, ZHANG Cheng, LI Wei, HUANG Wen-yao, QIN Hui-min, DI Xin

(Beijing Gas Group Co., Ltd., Beijing 100011, China)

**Abstract:** To clarify the interference situation, interference law and corrosion law of different pressure level system of mega-city gas pipeline network under the influence of different railroad lines, 37 test piles of nearly 10 pipelines crossing or parallel with electrified railroad were selected for a 24-hour data monitoring and analysis, and the interference law and risk situation of Beijing area under dynamic AC stray currents were identified. Results showed that sub-high voltage and above gas pipeline networks were significantly more affected by the interference of electrified railroad than medium and low voltage pipeline network in Beijing area; the sacrificial anode cathodic protection system of city gas pipeline network had a certain degree of drainage mitigation and anti-interference function for stray current interference; the AC interference on pipelines parallel with electrified railroad was greater than that on crossing pipelines, and the peak was related to locomotive location. For the corrosion risk under dynamic AC interference, it was recommended to evaluate it by combining the proportion of AC current density range with outage potential.

**Key words:** city gas; electrified railroad; dynamic AC; interference law; corrosion risk

## 0 前言

随着能源工业和交通运输业的快速发展,高铁电气化铁路与埋地油气管道等基础设施大规模建设,形成了错综复杂、遍布各地的能源输送网和交通运输网。由于受到空间资源、地理环境的限制,地铁轨道交通、高铁电气化铁路与埋地钢质管道常常在“公共走廊”长距离并行或交叉而建,使管道所面临的杂散电流干扰问题十分严重<sup>[1-3]</sup>,国内外已经报道了多起电气化铁路

杂散电流腐蚀造成的穿孔泄漏案例。截至2021年底,北京燃气在役的埋地钢质管道已超过1.7万km;另外,北京是全国最大的铁路枢纽,有京广线、京沪线、京哈线、京包线、京通线等众多铁路干线呈辐射状通向全国各地,庞大的轨道交通及电力网络与燃气管网密集地分布在北京地区。

国内外意识到电气化铁路对管道带来的腐蚀风险,逐步开展了检测及防护工作。程彤等<sup>[4]</sup>选取北京境内京沪高铁沿线的9条交叉燃气管线进行了测试,

[收稿日期] 2022-08-10

[基金项目] 北京市博士后科研活动经费(A062-2022)资助

[通信作者] 张玉星(1988-),高级工程师,硕士,研究方向为腐蚀与防护,电话:15201451152, E-mail:zyxustb@163.com

结果表明最大干扰电位达到 5 V,证实京沪高铁沿线的燃气管道受到了动态交流干扰。郭庆茹等<sup>[5]</sup>对哈大铁路邻近的东北输油管网进行交流干扰监测,结果表明多数管段干扰电压超过 10 V。汪可对某段与贵昆铁路并行占 40%的成品油管道进行监测,通过测量机车通过时铁轨上的交流电压值及管道交流电压值发现,管道的交流干扰电压与电气化铁轨上交流电压变化成正相关<sup>[6]</sup>。沈光霁等<sup>[7]</sup>对日东线进行现场监测,发现列车通过时段管道交流电压明显增大,而列车通过后管道交流电压又保持相对平稳,因此判断干扰源为临近的新石线交流电气化铁路。国内相关单位<sup>[8-12]</sup>在乌鲁木齐、珲春、镇江等多地陆续发现电气化铁路对邻近管道的动态交流干扰,最大干扰电流密度高达 393 A/m<sup>2</sup>。同时发现电气化铁路杂散电流干扰对阴极保护系统造成了较大的影响,比如中部某省天然气管道即使有外加电流阴极保护的情况下,动态交流电流密度峰值仍高达 165 A/m<sup>2</sup><sup>[13]</sup>;中山南朗段受电气化铁路干扰,阴极保护系统恒电位仪不能正常工作,同时沿线阴极保护断电电位漂移严重<sup>[14]</sup>。

通过以上调研可以看出,交流电气化铁路使得管道存在明显动态干扰,部分研究表明干扰变化规律与机车运行位置相关,一定程度上影响外加电流阴极保护系统。但现有研究多集中于长输管网,相对于城市燃气管网而言,阴极保护方式多为牺牲阳极系统,且管网服役环境相对复杂,因此对于超大城市燃气管网不同压力级制在不同铁路线路影响下的干扰情况、干扰规律、腐蚀规律还需进一步研究。

## 1 现场试验

为了获得城市燃气管网受电气化铁路动态交流干扰的程度,针对中低压选取了西郊铁路、京包铁路、丰沙铁路,针对次高压及以上选取了京沪、京承、京广、京哈铁路,分别进行了管地电位、交流电压、交流电流密度等参数的监测,并埋设检查片进行了腐蚀速率测试,初步研究了管道的干扰规律及腐蚀规律。

### 1.1 交流干扰及阴极保护参数监测

对于选定的监测点进行交流干扰的专项测试。交流干扰专项检测包括:长时间交流干扰电压测试、交流电流密度测试。

(1)交流干扰电压监测 利用 uDL2 数据记录仪进行长时间交流干扰电压监测,设置仪器的数据记录频率为 1 s 和记录时间为 24 h,记录管道的交流电压。监测接线见图 1。通过专用软件,导出电压数据,绘制 24

h 的交流干扰电压曲线。

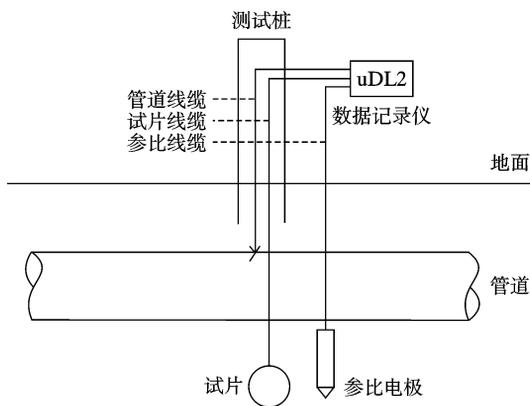


图 1 参数监测接线示意图

Fig. 1 Parameter monitoring wiring diagram

(2)交流干扰电流密度监测 采用 1 cm<sup>2</sup>试片法测试交流电流密度,数据记录频率与交流电压一致。

(3)阴极保护参数监测 通断电电位监测的设置原则是:断电时间应尽可能的短,以避免管道明显的去极化,但又应有足够长的时间保证测量采集及在消除冲击电压影响后读数。通断周期设置为:通电 12 s,断电 3 s。

### 1.2 腐蚀速率片埋设试验

为了得到电气化铁路杂散电流干扰对管道的腐蚀规律,对部分测试桩埋设腐蚀速率片,试片与管道电连接,一定程度上代表了管道防腐层破损点。试片埋设时间不少于 1 a,通过对试片埋设前后的失重测量计算试片腐蚀速率。除此之外,可以同步采用埋入式土壤腐蚀监测传感器进行在线测量,更有利于实时掌握腐蚀状态。

腐蚀产物用酸洗液(500 mL 去离子水+500 mL 盐酸+3.5 g 六次甲基四胺配制而成)浸泡试样 10 min 并轻刷除去试样表面腐蚀产物,随后用去离子水、乙醇清洗,冷风吹干,用精度为 0.1 mg 的电子天平测量其失重。采用公式(1)计算试样腐蚀速率:

$$v_d = 8.76 \times \frac{\Delta w}{St\rho} \times 10^4 \quad (1)$$

式中: $v_d$  为腐蚀速率,mm/a; $\Delta w$  为试样失重,g; $S$  为试样工作面积,cm<sup>2</sup>; $t$  为埋设时间,h; $\rho$  为试样的密度,g/cm<sup>3</sup>。

## 2 中低压管网动态交流干扰数据分析

为了获得中低压管网受电气化铁路的干扰影响情况,对西郊铁路、京包铁路、丰沙铁路等 4 处与燃气管线交叉位置测试桩进行交流参数监测,总体分析结果表明以上 4 个位置的管道交流电压及交流电流密度较低,基本未检测到电气化铁路造成的动态交流干扰。

## 2.1 西郊铁路交叉管道测试

该管道的防腐层为石油沥青,对距离西郊铁路与管线交叉点约 1.7 km 的测试桩进行 24 h 交流干扰监测(见图 2),结果表明管道交流电压在 0.18~0.65 V 之

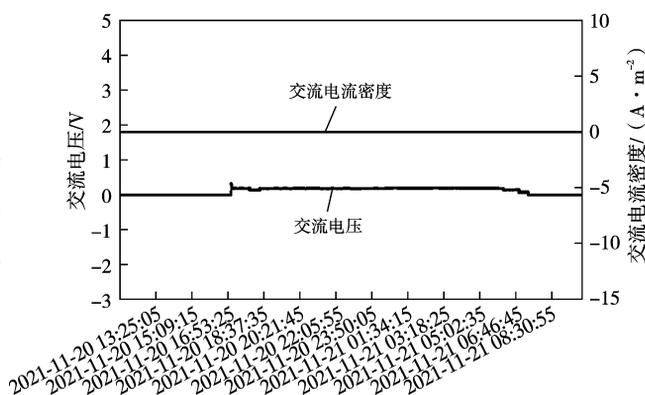
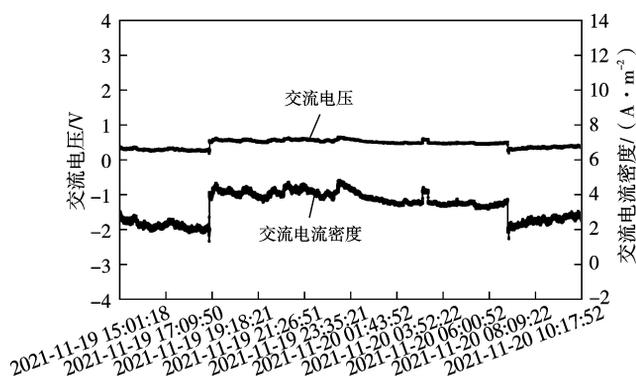


图 2 西郊铁路交叉点 1.7 km 及 2.1 km 处交流干扰数据图

Fig. 2 AC interference data graph at 1.7 km and 2.1 km from the intersection point of the pipeline and Western Country Railway

## 2.2 京包铁路交叉管道测试

该管道的防腐层为石油沥青,对距离京包铁路与管线交叉点约 30 m 的测试桩进行 24 h 交流干扰监测(见图 3),结果表明管道交流电压在 0.03~0.13 V 之间,交流电流密度在 0.25~0.92 A/m<sup>2</sup>之间,虽然该测试桩与铁路线路距离较近,但仍未检测明显的交流干扰。

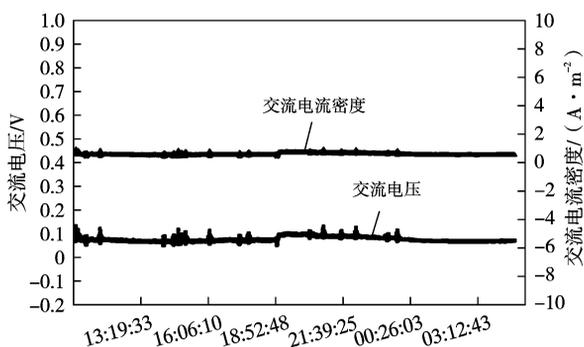


图 3 京包铁路交叉点 30 m 处交流干扰数据图

Fig. 3 Ac interference data graph at 30 m from the intersection point of the pipeline Beijing-Baotou Railway

## 2.3 丰沙铁路交叉管道测试

该管道的防腐层为石油沥青,对距离丰沙铁路与管线交叉点约 2.2 km 的测试桩进行 24 h 交流干扰监测(见图 4),结果表明管道交流电压在 0.41~1.26 V 之间,交流电流密度为 0 A/m<sup>2</sup>。

## 2.4 小结

通过对以上监测数据的分析发现,城市燃气中低压管网受铁路干扰影响较小,主要有以下原因:一是电气化铁路干扰多为电阻耦合与电感耦合叠加的形式存

在,交流电流密度在 1.33~4.83 A/m<sup>2</sup>之间。对西郊铁路另一条交叉管线的 2.1 km 的测试桩进行干扰监测,管道交流电压在 0~0.32 V 之间,同样未检测到明显的交流干扰。

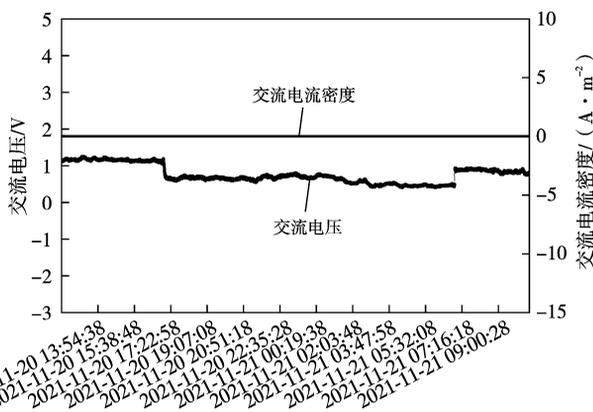


图 4 丰沙铁路交叉点 2.2 km 处交流干扰数据图

Fig. 4 Ac interference data graph at 2.2 km from the intersection point of the pipeline and Fengsha Railway

在,对于交叉位置而言主要为电阻耦合,基本不存在电感耦合,从而干扰影响较小;二是城市燃气中低压管网服役年限较长,局部管道的接地电阻相对较小,且与其它构筑物搭接较多,因此交流干扰得到一定程度的排流缓解。

## 3 次高压及以上管网动态交流干扰数据分析

为了获得次高压及以上管网受电气化铁路的干扰影响情况,对京沪、京承、京广、京哈等电气化铁路附近的交叉、并行管道进行交流参数检测,虽然次高压及以上管网均有牺牲阳极阴极保护,但相对于中低压管网而言,次高压及以上管网受动态交流干扰的影响仍相对明显。需要进一步说明的是,在交流参数检测之前,针对上述燃气管线附近的土壤电阻率进行了测试,测试结果均在 50~80 Ω·m 范围内,因此土壤电阻率对

于交流干扰的影响可以忽略。依据 GB/T 50698 相关条款,当管道上的交流干扰电压不高于 4 V 时,可不采取交流干扰防护措施;高于 4 V 但交流电流密度小于 30 A/m<sup>2</sup>时,干扰程度评价为弱,可不采取交流干扰防护措施。

### 3.1 京沪高铁交叉管道测试

该管道的防腐层为 3PE,分别选取交叉点上下游 5 个测试桩进行 24 h 交流干扰监测,结果表明 5 处交流电压和交流电流密度均较小,远低于标准规定的限值,见图 5。

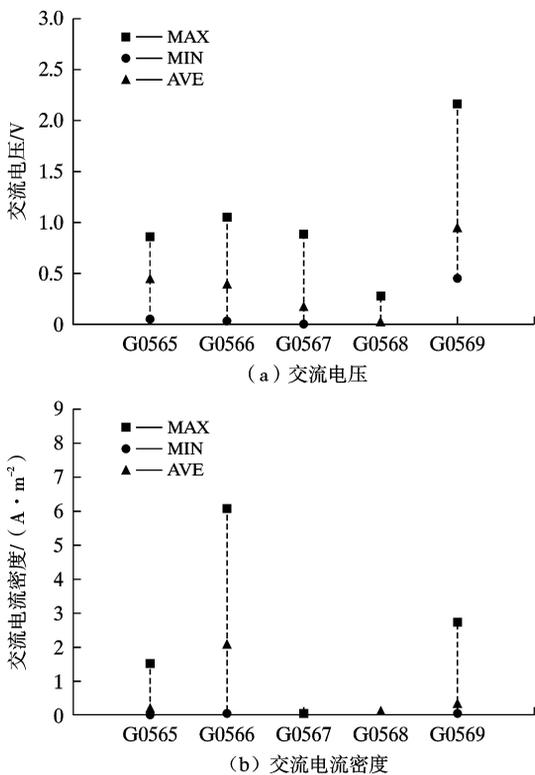


图 5 京沪高铁交叉段管道交流干扰数据图

Fig. 5 AC interference data graph of the pipeline crossing with Beijing-Shanghai high-speed Railway

但通过某一测试桩的 24 h 交流电压及电流密度分布来看,不同于中低压管网的干扰参数分布,该处部分时间点出现交流电压的冲击峰,说明存在电气化铁路造成的动态交流干扰。

### 3.2 京承铁路交叉管道测试

该管道的防腐层为 3PE,分别选取交叉点上下游 4 个测试桩进行 24 h 交流干扰监测,结果表明 4 处交流电压和交流电流密度均较小,见图 6、图 7。

但与京沪高铁对管道的干扰规律存在不同,在监测的 24 h 内交流干扰仅有 7 个冲击峰,其它时间交流参数稳定,见图 8。初步分析是铁路与该位置的馈电状态及泄漏电压相关。

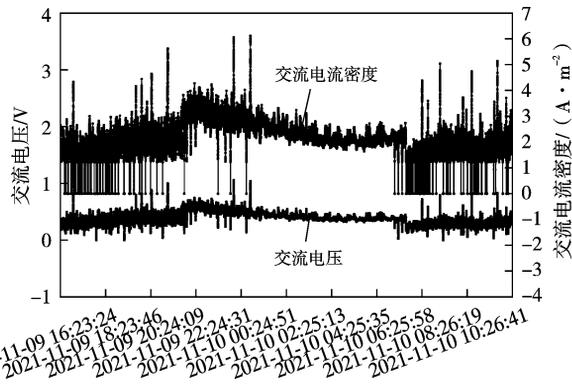


图 6 某测试桩 24 h 交流电压及电流密度分布图  
Fig. 6 AC voltage and current density distribution graph of a test pile for 24 hours

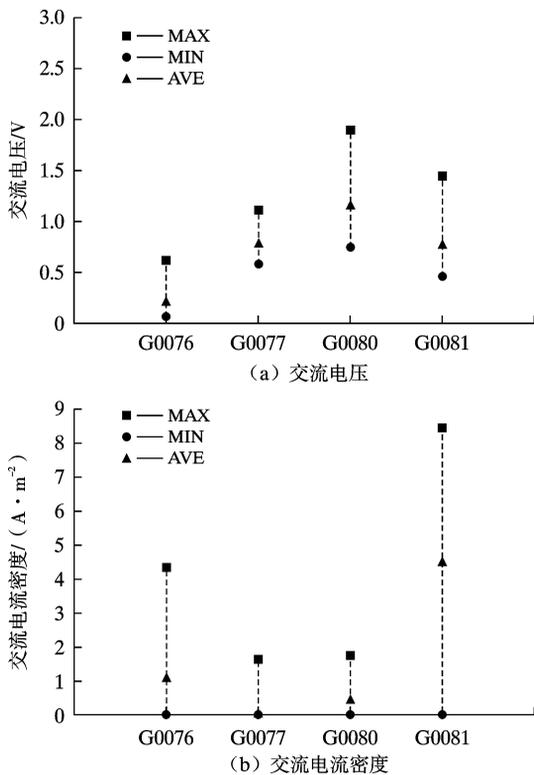


图 7 京承铁路交叉段管道交流干扰数据图

Fig. 7 AC interference data graph of the pipeline crossing with Beijing-Chengde Railway

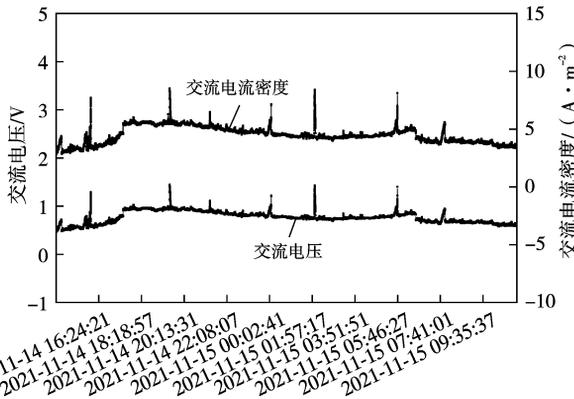


图 8 某测试桩 24 h 交流电压及电流密度分布图  
Fig. 8 AC voltage and current density distribution graph of a test pile for 24 hours

### 3.3 京广高铁并行管道测试

该管道的防腐层为3PE,京广高铁与管道约有7.6 km的并行,并行间距在33~250 m之间,对并行段11个测试桩进行24 h交流监测,测试结果见图9。图9显

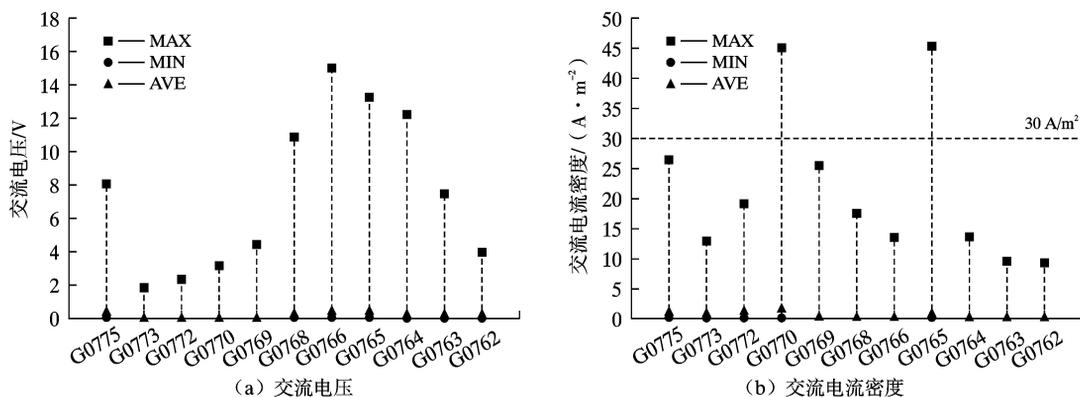


图9 京广高铁并行段管道交流干扰数据图

Fig. 9 AC interference data graph of pipeline in parallel section of Beijing-Guangzhou high-speed Railway

通过某一测试桩24 h数据来看,交流电压呈现脉冲式波动,在有列车通过时,管道上的交流电压会有冲击上升。在夜间无高铁经过时,管道交流电压相对稳

定。与京沪、京承铁路不同的是,该管道与京广高铁存在长距离并行,从而交流干扰相对明显,见图10。

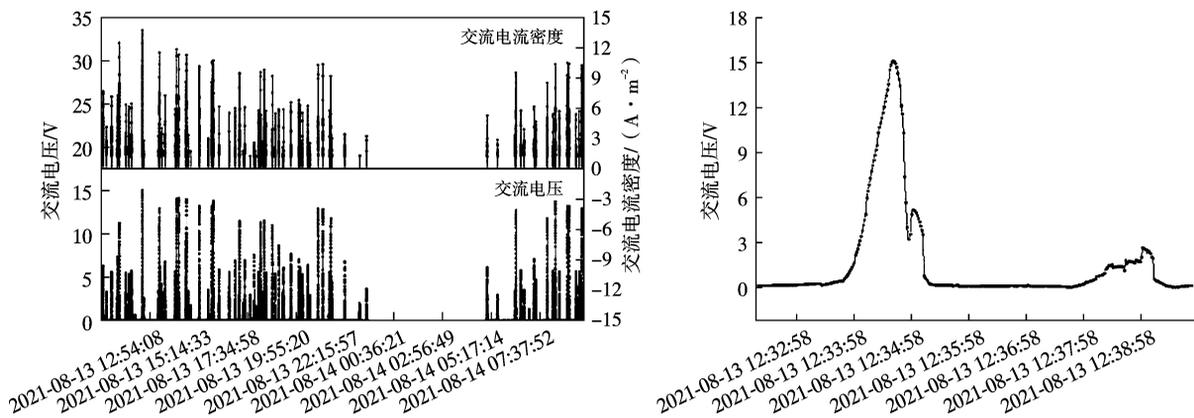


图10 某测试桩24 h交流干扰数据图

Fig. 10 AC interference data graph of a test pile for 24 hours

### 3.4 京哈高铁并行管道测试

京哈高铁与太阳宫热电厂高压A管道有交叉并行。京哈高铁与此段管道有1处交叉,分别在管道的北面,与管道约有10 km的并行,并行的间距在32~600 m之间。在该管道的14个测试桩埋设了18个与管道连接的腐蚀速率测试片,试片的面积为 $6.5 \text{ cm}^2$ 。对于试片进行24 h的监测,结果表明检查片的24 h交流电压分布在0~7.99 V之间,交流电流密度分布在0~29.94  $A/m^2$ 之间,见图11。

通过对腐蚀速率检查片埋设周期超过1 a后,进行开挖、酸洗、称重并计算腐蚀速率,分别统计交流电

流密度峰值、平均值与腐蚀速率的关系,结果见图12。图12结果表明腐蚀速率基本均低于标准值 $0.025 \text{ mm/a}$ ,由于腐蚀速率偏低,所以没有呈现较好的相关性。

除此之外,对腐蚀检查片阴极保护电位数据进行统计,由于该管段加装了锌牺牲阳极排流防护,因此断电电位的平均值基本都处于 $-0.85 \sim -1.20 \text{ V (vs CSE)}$ 之间。对于动态交流干扰腐蚀风险评价,后续研究建议现场与实验室两方面结合,收集交流电流密度及断电电位参数,并与腐蚀速率建立关联,通过统计交流电流密度区间比例与断电电位的方式进行评价。

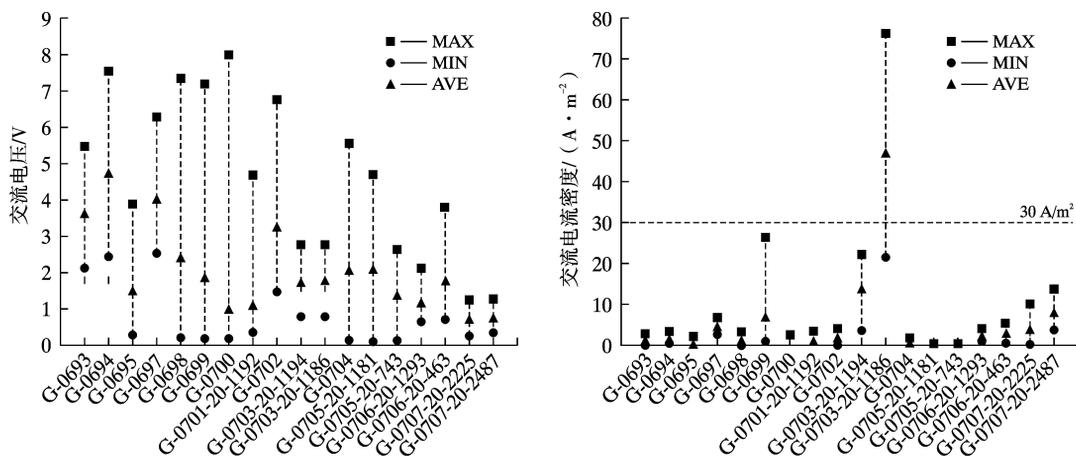


图 11 京哈高铁并行段管道检查片交流干扰数据图

Fig. 11 Ac interference data graph of the inspection piece of the pipeline in parallel section of Beijing-Harbin high-speed Railway

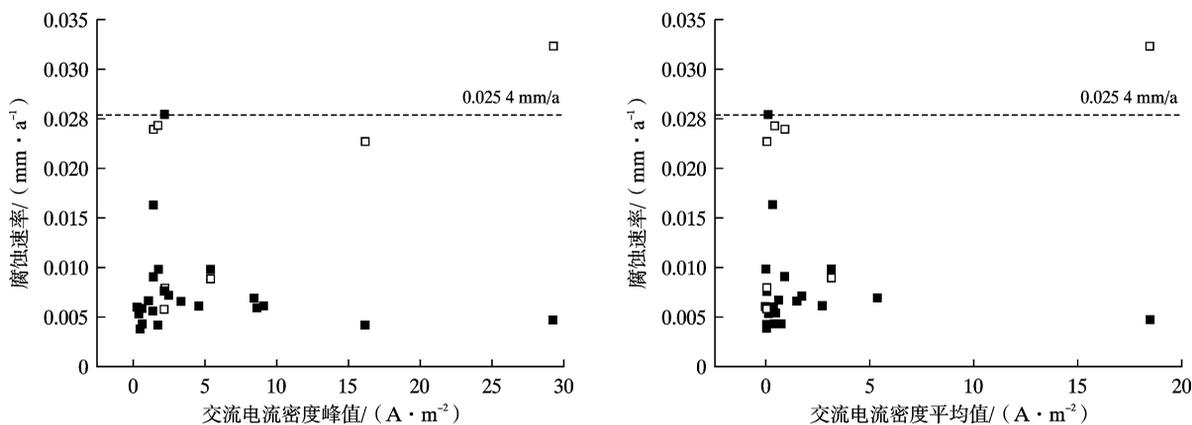


图 12 检查片交流电流密度与腐蚀速率数据图

Fig. 12 AC current density and corrosion rate data graph of the inspection piece

### 3.5 电气化铁路干扰原理分析

交流电气化铁路由于采用单相对地不平衡供电方式,对管道的危害主要在于列车通过时,接触网在正常或短路故障条件下,由于感性、阻性耦合产生间歇或连续的交流干扰电压作用在管道上。

感性耦合是由接触网牵引电流所产生的交变电磁场,通过管道与接触网之间存在的互感而产生的对管道的影响。主要是由机车牵引电流流过接触网时产生的交变电磁场通过空气、土壤等传导电磁波的介质在管道上由于互感作用感应出的纵向电动势,电压大小与并行长度成正比。针对感性耦合影响要考虑接触网正常供电和短路故障 2 种状态。

阻性耦合是由于接触网牵引电流通过钢轨回流时,电流通过钢轨泄漏入地,使入地点及附近的大地电位升高,由于阻性耦合的存在,使路基附近的管道处于地电位梯度变化剧烈的土壤中而引起管道的地电位升高。

### 3.6 小结

通过对以上监测数据的分析发现,一是城市燃气

次高压及以上管网受电气化铁路干扰影响明显高于中低压管网;二是电气化铁路与管道并行的交流干扰明显大于交叉段,感性耦合对管道影响大于阻性耦合;三是虽然京哈高铁并行管道的交流干扰电压偏大,但交流电流密度较低,原因可能与选用的试片面积偏大有关。

## 4 结论

(1)城市燃气中低压管网由于防腐层绝缘性能相对较差且与其它构筑物搭接较多,交流干扰得到一定的缓解,因此受电气化铁路干扰影响较小,但与此同时中低压管网阴极保护效果相对较差。相对而言,次高压及以上管网受电气化铁路干扰影响明显高于中低压管网。

(2)城市燃气管网阴极保护系统多采用牺牲阳极,相对于外加电流阴极保护系统中恒电位仪受电气化铁路干扰影响而导致的阴保异常,牺牲阳极系统一定程度上对杂散电流干扰具有一定的排流缓解及抗干扰

功能。

(3)与电气化铁路并行管道的交流干扰大于交叉管道,并行管道的交流峰值的出现与列车运行位置有关,可初步推断电气化铁路的干扰存在电阻耦合。但至于电阻耦合与电感耦合对于交流干扰大小的影响程度,还需通过多点同步监测进一步深入分析。

(4)对于动态交流干扰的腐蚀风险评价,本工作的腐蚀速率试片面积选用  $6.5 \text{ cm}^2$ 时,所测得的交流电流密度偏低;关于交流干扰测试,一是建议采集试片埋设区域的土壤电阻率以便于分析干扰程度时进行参考;二是建议选用  $1 \text{ cm}^2$ 试片以保证交流电流密度更为准确。最后通过交流电流密度区间所占比例与断电电位相结合的方式评价。

### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] GUO Y B, LIU CHENG, WANG D G, et al. Effects of alternating current interference on corrosion of X60 pipeline steel[J]. Petroleum Science, 2015, 12: 316-324.

[ 2 ] HAN P, QIAO G F, GUO B B, et al. Investigation of the low-frequency stray current induced corrosion on reinforced concrete infrastructure in high-speed rail transit power supply system[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2022, 1(134): 107-136.

[ 3 ] 赵志超,张少春,李体容. JZ-RZ 长输天然气管道交流干扰缓解设计[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(4): 28-30.

ZHAO Z C, ZHANG S C, LI T R. Ac interference mitigation design of JZ-RZ long distance natural gas pipeline.[J]. Total Corrosion Control, 2015, 29(4): 28-30.

[ 4 ] 程 彤,付山林,齐永明,等.电气化铁路对埋地钢质燃气管道的交流干扰研究[J].管道技术与设备, 2012(4): 37-39.

CHENG T, FU S L, QI Y M, et al. Study on AC interference of electrified railway on buried steel gas pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2012(4): 37-39.

[ 5 ] 郭庆茹,何悟忠,左 戈,等.电气化铁路对输油管道的干扰及其防护方法的研究[J].石油工程建设, 2005(4): 51-54.

GUO Q R, HE W Z, ZUO G, et al. Study on the interference of electrified railway on oil pipeline and its protection method[J]. Petroleum Engineering Construction, 2005(4): 51-54.

[ 6 ] 汪 可.电气化铁路对油气管道的影响及防护措施[D].成都:西南交通大学, 2013.

WANG K. Influence of electrified railway on oil and gas

pipeline and protective measures [ D ]. Chengdu : Southwest Jiaotong University, 2013.

- [ 7 ] 沈光霁,赵建涛,刘振斌,等.电气化铁路对长输管道的交流干扰及防护[J].腐蚀与防护, 2016, 37(12): 1 010-1 014.
- SHEN G J, ZHAO J T, LIU Z B, et al. AC interference and protection of long - distance pipelines by electrified railways [J]. Corrosion & Protection, 2016, 37(12): 1 010-1 014.
- [ 8 ] 鲜 俊,王文斌,梅 鹏,等.电气化铁路杂散电流对埋地管线干扰影响研究[J].全面腐蚀控制, 2013, 27(4): 42-46.
- XIAN J, WANG W B, MEI P, et al. Protection measures against electromagnetic interference from oil and gas pipelines by high - speed electrified railways [J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(4): 42-46.
- [ 9 ] 李南星.高速电气化铁路对油气管道电磁干扰的防护措施[J].企业导报, 2015(15): 148.
- LI N X. Protection measures against electromagnetic interference from oil and gas pipelines by high - speed electrified railways [J]. Guide to Business, 2015(15): 148.
- [ 10 ] 卫 续. 交流电气化铁路对埋地管道腐蚀干扰研究 [ D ]. 青岛:中国石油大学(华东), 2012.
- WEI X. Study on corrosion interference of AC electrified railway on buried pipeline [ D ]. Qingdao : China University of Petroleum, 2012.
- [ 11 ] 陈 亮.苏南成品油管道交流杂散电流干扰检测及防护措施[J].腐蚀与防护, 2015, 36(8): 779-783.
- CHEN L. Detection and protection measures of AC stray current interference of oil pipeline in southern Jiangsu Province [J]. Corrosion & Protection, 2015, 36(8): 779-783.
- [ 12 ] 吴长访,王 波,裴 青,等.铁秦线管道交流杂散电流干扰检测与评价[J].管道技术与设备, 2014(1): 36-38.
- WU C F, WANG B, PEI Q, et al. Detection and evaluation of AC stray current interference in Tieqin pipeline [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2014(1): 36-38.
- [ 13 ] 高志贤,赵世豪.交流电气化铁路对某输气管道的交流干扰及防护措施[J].全面腐蚀控制, 2016, 30(9): 26-30.
- GAO Z X, ZHAO S H. AC interference and protective measures of AC electrified railway on a gas pipeline [J]. Total Corrosion Control, 2016, 30(9): 26-30.
- [ 14 ] 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 Y Q, WANG X T, CHENG S L. Detection and control of stray current of buried natural gas pipeline in Nanlang section [J]. Surface Technology, 2016, 45(2): 22-27.