

燃气顶管管道检测方案设计及腐蚀风险评价研究

张玉星, 张慎颜, 覃慧敏, 张 诚, 马旭卿, 黄文尧

(北京市燃气集团有限责任公司, 北京 100011)

[摘 要] 针对顶管管道腐蚀参数检测装置及测试系统不完善的问题,设计了一套柔性环绕式的管道检测装置,结合配套的地面测试桩,可便捷地测试相关电位及电流,满足了腐蚀风险评价的数据需求。最终建立了基于电流-电位法的防腐层面电阻率计算、基于密间隔电位(CIPS)的防腐层破损点判断、基于电流趋势的牺牲阳极性能诊断、基于试片电流密度的腐蚀速率预测等方案,进而制定了防腐层面电阻率、破损点、牺牲阳极性能、阴极保护效果、腐蚀速率等单项风险评价方法,构建了顶管管道局部监测点及整体管段的腐蚀风险综合评价体系,对于管道的腐蚀风险的预防性管理有一定指导意义。

[关键词] 顶管管道; 检测装置; 腐蚀参数采集; 性能评价; 腐蚀评价体系

[中图分类号] TE988.2 **[文献标识码]** B **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2023.0047

[文章编号] 1001-1560(2023)02-0164-06

Inspection Scheme Design and Corrosion Risk Assessment of Gas Pipe-Jacking Pipeline

ZHANG Yu-xing, ZHANG Shen-yan, QIN Hui-min, ZHANG Cheng, MA Xu-qing, HUANG Wen-yao

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

Abstract: In view of the imperfection of the pipe-jacking pipeline corrosion parameter detection device and testing system, a set of flexible surrounding pipeline detection device was designed. With the support of ground test pile, this device could measure relevant potential and current easily, meeting the data requirements of corrosion risk assessment. Finally, the resistivity calculation of the anti-corrosion layer based on the current potential method, the judgment of the damage point of the anti-corrosion layer based on the close interval potential (CIPS), the diagnosis of the sacrificial anode performance based on the current trend, and the prediction of the corrosion rate based on the current density of the test piece were established. Furthermore, the single risk assessment methods regarding the electrical resistivity of the anti-corrosion layer, the damage point, the sacrificial anode performance, the cathodic protection effect and the corrosion rate were formulated. The comprehensive evaluation system of corrosion risk of the local monitoring points and the whole pipe section was established, which would have great guiding significance for the preventive management of the pipeline.

Key words: pipe-jacking pipeline; detection device; corrosion parameter collection; performance evaluation; corrosion evaluation system

0 前 言

当燃气管道需要穿越电气化铁路、地铁轨道等重要交通基础设施时,常用到非开挖施工技术,由于顶管方式的控制精度高且对周边土体扰动较小^[1,2],所以常以顶管方式穿越,且多采用混凝土套管,套管与钢管之间喷砂填充,阴极保护一般采用镯式阳极,顶管两端安装绝缘接头^[3-5]。顶管施工的最大特点是在进行管道铺设的过程中,不需要大面积开挖,尤其在城市燃气中可有效避免对城市交通及环境的破坏,因此该施工工艺得到广泛应用。与此同时,国内外多地发现顶管腐

蚀案例,最大腐蚀深度达80%管道壁厚^[6],可以说非开挖施工在带来便利的同时,也埋下了很多腐蚀隐患^[7]。

顶管管道的泄漏存在以下特点:首先,由于埋深较大,导致常规的泄漏点检测方法效果较差,泄漏点定位困难;其次,对非开挖管道的维修及更换相对复杂;另外,非开挖穿越管道属于燃气干线,技改维修的影响区域大。

蒋卡克^[8]对上海高压燃气管道350余处顶管工程进行检测后发现存在套管与管道搭接、阳极失效、套管密封失效等问题,均会影响管道的阴极保护效果。基于此,及时对阴极保护参数采取便捷、有效的监测,

[收稿日期] 2022-08-27

[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,硕士研究生,主要研究方向为腐蚀与防护,电话:15201451152, E-mail:zyxustb@163.com

并开展腐蚀风险评价至关重要。

刘波等^[9]分析了套管内部主管道发生腐蚀的主要原因,并提出实时监测主管道腐蚀状况、准确掌握腐蚀动态并及时修复,是减少安全事故发生的重要途径。

伏喜斌^[10]针对燃气顶管施工段利用检漏管测试气体泄漏情况,借助内窥镜插入检漏管,对密封空间及管体进行外观检查并测试阴极保护效果。但该方法操作复杂,且检测到的腐蚀参数不足以预测顶管风险。

目前由于部分管道在建设期没有合理设置腐蚀参数检测装置及测试系统,导致运行之后无法得到防腐层、阴极保护相关参数;其次,目前多采用硫酸铜参比电极,而其使用寿命、外观结构及安装方式不适用于顶管工程;最后,腐蚀评价多关注断电电位数据,缺乏腐蚀风险综合评价方法。基于此,本工作采用一套完整的腐蚀参数检测装置及方案,构建顶管管段的腐蚀风险综合评价体系,对于管道的预防性管理有一定指导意义。

1 顶管检测装置设计及安装方案

针对顶管工程腐蚀检测问题,由于混凝土套管与钢管之间多数采用喷砂填充的方式,因此常规的参比电极埋设方式难以适用;另外,常用的硫酸铜参比电极往往存在电解液流失及冻结、前端渗透材料堵塞等引起的参比失效问题,对于顶管管道而言,后续更换参比电极难度极大。基于以上原因,需要重新设计参比电极的材料及安装,以满足顶管管道的检测要求。

1.1 检测装置设计

在参比电极材料方面,选用高纯锌参比电极。高纯锌参比电极属于制作简单、使用寿命长的固体参比电极。通过覆盖2~5 cm厚度的牺牲阳极填充料以保持参比电极湿润及与土壤有良好的接触,从而保证锌参比电极电位稳定;在安装方式方面,采用柔性环绕式安装,更加适用于顶管施工工艺的要求。检测装置由测试盒、连接带及连接螺栓构成,其中测试盒用于采集腐蚀参数,设有高纯锌参比电极、测试试片、测试导线及支撑柱等。

测试试片采用凸出式圆柱体结构,漏出的圆柱体尺寸为1 cm²,该结构能够保证试片能与土壤充分接触;测试导线孔位于测试盒上部,用于通过参比电极、测试片导线;支撑柱能够保持参比电极与管道有一定的间隙,保证介质可以进入,从而不影响测试效果。

测试盒中放置参比电极、测试片、连接带后,通过导线孔浇注环氧树脂进行封装,最后通过密封螺母实

现对导线孔的密封。接带及连接螺栓用于将检测装置固定在管道上,连接带上设有定位孔,根据管径需求适当调整长度。检测装置结构示意图见图1。

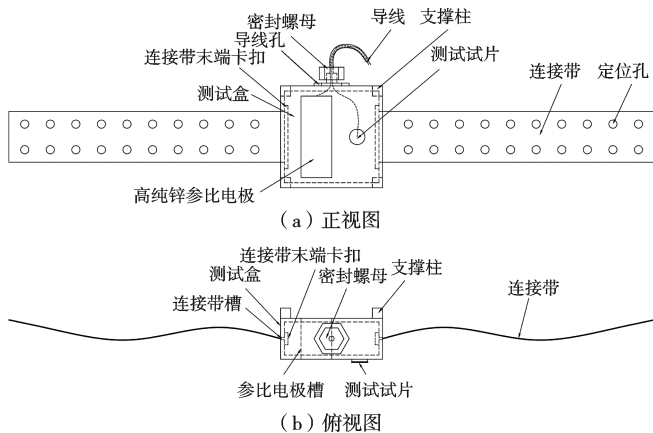


图1 检测装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure of detection device

1.2 安装方案

顶管腐蚀参数检测点随镯式牺牲阳极均匀布设,针对每个检测点设置2个检测装置,一是确保能够准确测得管地电位,二是作为备用装置。检测装置分别布设在管顶及管底,并将测试导线通过管道与套管的密封口引出至地面测试桩,以满足监测腐蚀参数的要求。管道外壁与检测装置安装的结构示意图见图2。

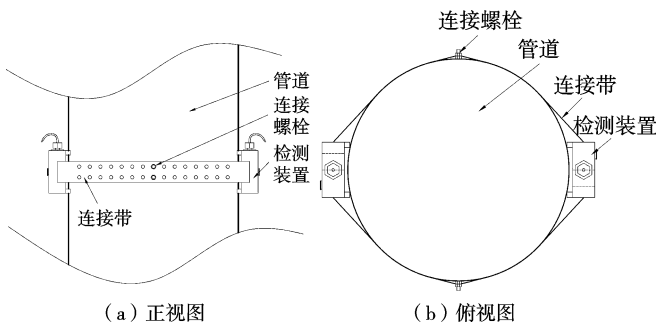


图2 管道外壁与检测装置安装的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structure of installation of pipeline outer wall and detection device

为了便于测试,在每个检测点设置地面测试桩,测试桩分别设有参比电极接线柱、试片接线柱、牺牲阳极接线柱、管道接线柱,利用接线柱的电路连接实现阴极保护系统的运行及对相关参数的检测。需要说明的是,由于顶管管道多用于穿越地铁、铁路等重要交通基础设施,不仅杂散电流干扰腐蚀风险大,而且一旦发生泄漏所带来的事故后果及修复成本较大,因此建议采用智能测试桩,实时监测并上传管道及试片的腐蚀参数,更有利于及时预警阴极保护失效风险。顶管检测装置安装的整体示意图见图3。

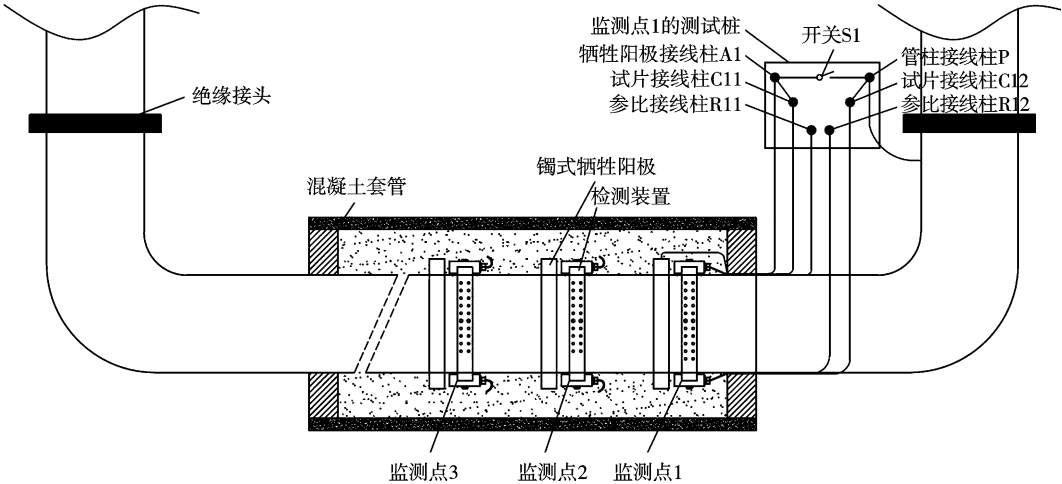


图 3 顶管检测装置安装的整体示意图

Fig. 3 Overall schematic diagram of installation of pipe jacking detection device

2 顶管腐蚀参数采集及数据处理

顶管管道在建设期往往没有合理设置腐蚀参数检测装置及测试系统,导致管道运行之后无法得到防腐层、阴极保护等腐蚀参数,从而造成顶管管道检测困难,难以进行腐蚀风险评价。上述内容从检测装置、电路设计等方面建立了一套针对顶管管道的完整的监检测方案,基于此可完成腐蚀参数采集及数据处理,为后续腐蚀风险评价提供支撑。

2.1 基于电流-电位法的防腐层面电阻率计算

通过地面测试桩保持顶管一侧的阴极保护系统运行,断开其余所有的阴极保护系统,即断开管道与牺牲阳极之间的电连接,断开时长至少 2 h,以确保局部完全去极化。此时整段顶管管道由一侧的牺牲阳极提供阴极保护,通过测试桩完成通断电电位及电流测试,检测数据的名称及符号见表 1。

表 1 检测数据的名称及符号

Table 1 Name and code of test data

物理量名称及单位	符号
电流环(开挖邻近 1、x 的浅埋段)计算泄漏电流/A	I
检测点 1 通、断电电位(vs CSE)/V	E_{1on}, E_{1off}
检测点 x(末端)通、断电电位(vs CSE)/V	E_{xon}, E_{xoff}
砂浆电阻率/($\Omega \cdot \text{cm}$)	ρ_{sand}
顶管管道外径/m	D
顶管管道检测点 1 至 x 的长度/m	L
防腐层面电阻率/($\Omega \cdot \text{m}^2$)	r
修正后的防腐层面电阻率/($\Omega \cdot \text{m}^2$)	$r_{1\ 000}$

根据参考文献[11]推导防腐层面电阻率:计算顶

管管道的检测点 1、x 的通/断电电位差: $\Delta E_1 = E_{1on} - E_{1off}$, $\Delta E_x = E_{xon} - E_{xoff}$;管段的平均电位差 $\Delta E_{1x} = (\Delta E_1 + \Delta E_x)/2$;顶管管段防腐层电阻 $R = \Delta E_{1x}/I$;顶管管段防腐层面电阻率 $r = R\pi DL$;最后将防腐层面电阻率修正到土壤电阻率为 1 000 $\Omega \cdot \text{cm}$ 环境下的面电阻率,即 $r_{1\ 000} = 1\ 000 \times r / \rho_{\text{sand}}$ 。

2.2 基于密间隔电位(CIPS)的防腐层破损点判断

保持与 2.1 一致的电路连接及断开状态,随后瞬时断开检测点 1 的牺牲阳极与管道连接线,并记录检测点 1 至 x 试片的断电电位 E_{1off} 至 E_{xoff} ,观察各个检测点的断电电位趋势。举例说明,假设($E_{3off} - E_{2off}$)与其他 2 个相邻点断电电位差的数值相差较大,则说明该管道的检测点 2、3 处存在破损点。

2.3 基于电流趋势的牺牲阳极性能诊断

通过在牺牲阳极与管道之间串联电流表,定期记录检测点 1 至 x 的牺牲阳极输出电流,观察每个检测点的输出电流变化趋势,并设定相邻时间段测得的输出电流变化阈值,到达阈值或出现电流突变时,说明该处牺牲阳极性能存在问题或故障,需要进行排查并重点关注。

2.4 基于试片电流密度的腐蚀速率预测

恢复整段管道的电路连接,通过在测试试片与管道之间串联电流表,记录各检测点的试片电流 I ,通过 I 的正负来判断电流流入流出方向。如果电流方向为流入试片,则此时受阴极保护,腐蚀速率默认为 0 至自腐蚀速率之间;若电流方向为流出试片,则计算电流密度,依据法拉第定律相关公式计算腐蚀速率。检测数据名称及符号见表 2。

表 2 检测数据名称及符号

Table 2 Name and code of test data

物理量名称及单位	符号
试片电流/A	<i>I</i>
试片电流密度/(A·m ⁻²)	<i>J</i>
试片面积/cm ⁻²	<i>A</i>
试片密度/(g·cm ⁻³)	<i>ρ</i>
试片摩尔质量/(g·mol ⁻¹)	<i>M</i>
电化学反应速率常数	<i>R</i>
法拉第常数	<i>F</i>
反应消耗或生成电子数	<i>n</i>
试片埋设时间/s	<i>t</i>
腐蚀失重/g	<i>m</i>
腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	<i>Y</i>

首先利用式(1)计算腐蚀失重:

$$m=\int_0^tR\cdot A\cdot M\cdot dt$$

(1)

然后利用式(2)计算腐蚀速率:

$$Y=\frac{10\times m}{\rho A\frac{t}{3\,600}}$$

(2)

3 腐蚀评价体系研究

利用检测装置实现了腐蚀参数的采集,并完成相应的数据计算及处理。为了实现腐蚀风险分级管控,需要制定相应的单项评价以及综合评价体系,包括防腐层性能评价、牺牲阳极性能评价、阴极保护有效性评价及腐蚀风险综合评价。

3.1 防腐层性能评价

通过表 3 中的指标对防腐层性能进行评价,由防腐层面电阻率确定对应的防腐层质量等级。当防腐层质量等级评价为“优或良”时,表明防腐层性能较好,暂时无需重点关注;当防腐层质量等级评价为“可”时,建议加密运维及监测频率;当防腐层质量等级评价为“差”时,建议对管线技改。

表 3 防腐层性能评价指标

Table 3 Performance evaluation index of anti-corrosion coating

管道防腐层质量等级	防腐层面电阻率 $r_{1\,000}/(\Omega\cdot\text{m}^2)$
优	$r_{1\,000}\geqslant1\times10^4$
良	$2\times10^3\leqslant r_{1\,000}<1\times10^4$
可	$1\times10^3\leqslant r_{1\,000}<2\times10^3$
差	$r_{1\,000}<1\times10^3$

3.2 牺牲阳极性能评价

对于牺牲阳极阴极保护系统而言,往往存在欠保

护乃至失效的风险,具体原因包括:服役年限超出牺牲阳极设计寿命、牺牲阳极成分不合格、牺牲阳极表面形成钝化膜等^[12],最终将会导致牺牲阳极的输出电流降低。通过观察牺牲阳极输出电流变化趋势,按时间顺序绘制电流曲线,并设定阈值,此处建议阈值可以设置为阴极保护系统初始运行稳定后牺牲阳极输出电流的30%,当到达阈值或出现输出电流突变时,说明该处牺牲阳极性能出现问题或故障,需要进一步排查原因。

3.3 阴极保护有效性评价

通过记录所有检测点的同步断电电位,以-0.85 V(vs CSE,下同)作为阴极保护有效性的判别指标:当部分检测点的断电电位正于-0.85 V 时,说明阴极保护系统存在问题,需进一步通过其他参数判断失效原因。

3.4 腐蚀风险综合评价

顶管管段的腐蚀风险综合评价主要从防腐层破损点情况、阴极保护断电电位情况、腐蚀速率情况等 3 个方面进行评判。首先分别对某段顶管管道的所有检测点 1 至 *x* 逐个进行评判;其次根据所有检测点的评判结果,形成对整段顶管管道的腐蚀风险综合评价,腐蚀风险综合评价体系流程图见图 4。主要依据以下步骤:

(1)依据第 2.2 节描述的防腐层破损点检测方法,判断顶管管段是否存在防腐层破损点:如果不存在,则该监测点评价为低腐蚀风险;如果存在,进入下一层次判定。

(2)若存在防腐层破损点,此时进入阴极保护断电电位判定:当断电电位负于-0.85 V 时,则该检测点评价为低腐蚀风险;当断电电位不负于-0.85 V 时,进入下一层次判定。

(3)当断电电位不负于-0.85 V 时,此时进入腐蚀速率判断:当腐蚀速率 $Y\leqslant0.025\text{ mm/a}$ 时,腐蚀风险低;当 $0.025\text{ mm/a}<\text{腐蚀速率 }Y<0.100\text{ mm/a}$ 时,腐蚀风险为中;当腐蚀速率 $Y\geqslant0.100\text{ mm/a}$ 时,腐蚀风险为高。

(4)基于对检测点 1 至 *x* 的单个评判结果,实现了整段顶管管道的腐蚀风险综合评价,具体判别指标如下:当检测点存在高腐蚀风险时,整段顶管管道综合评价为“高”;当检测点全部为低腐蚀风险时,整段顶管管道综合评价为“低”;其余情况整段顶管管道综合评价为“中”。

结合综合评价结果及运营单位情况,形成以下运行维护建议:顶管管道综合评价为“高”,建议补充牺牲阳极或者换管;综合评价为“中”,建议加密运维及监测频率;综合评价为“低”,延续原定运维及监测频率。

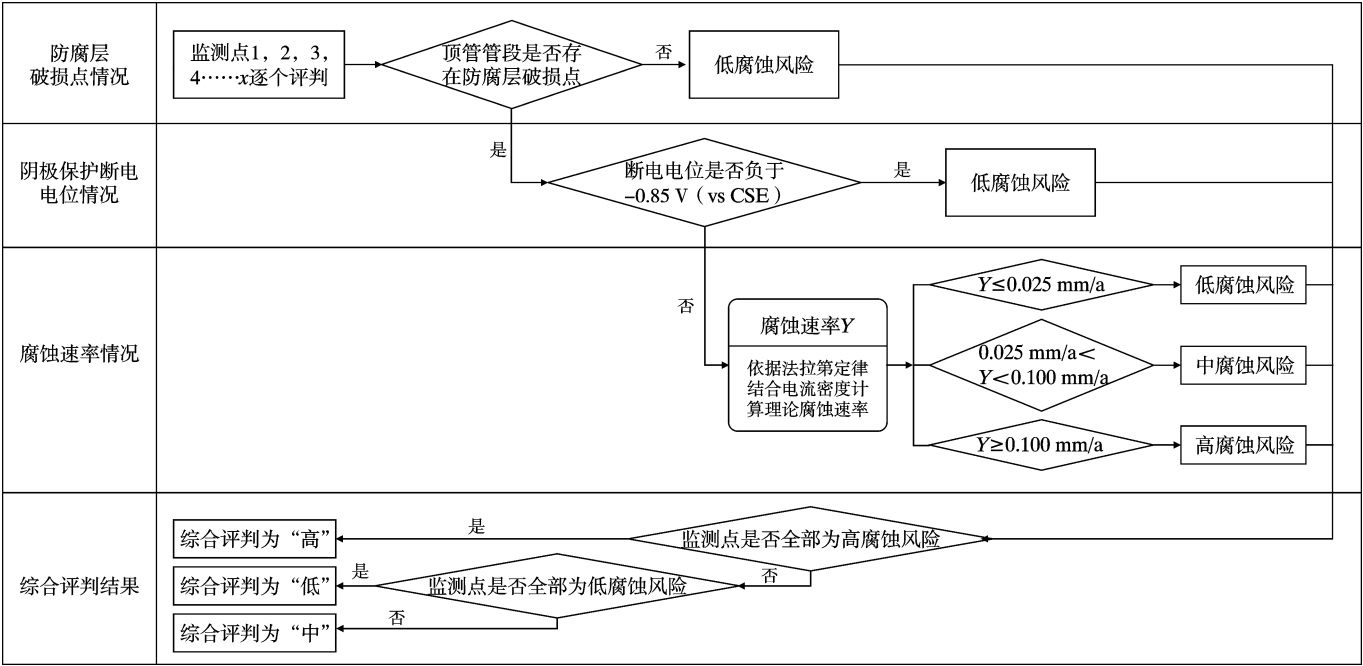


图 4 腐蚀风险综合评价体系流程图

Fig. 4 Flow chart of comprehensive evaluation system of corrosion risk

4 现场实测分析

对某段约 200 m 的管道进行了示范应用,共均匀布设 5 套检测装置及牺牲阳极,由于仅作示范应用,因此只做了部分断电电位和电流密度的测试,完成了基于密间隔电位的防腐层破损点判断、基于试片电流密度的腐蚀速率判断及基于断电电位的阴极保护有效性判断。

按照第 2 节介绍的电路连接及断开状态,测得 5 个监测点的断电电位如图 5 所示,初步判断该段管道无明显破损点。

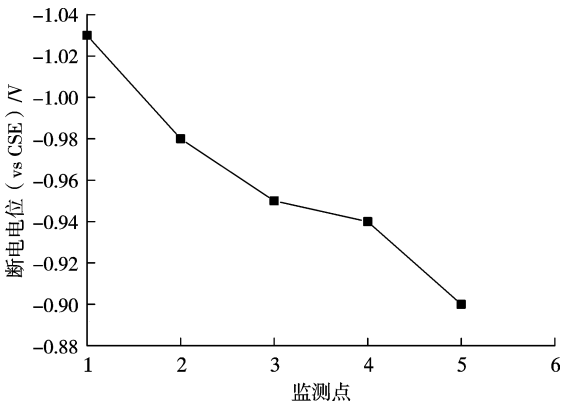


图 5 密间隔断电电位检测

Fig. 5 Detection of closely interval off-potential

对 5 个监测点试片进行电流密度检测,结果见表 4。由于电流方向均为流入试片,因此管道受阴极保护,腐蚀速率默认为 0 至自腐蚀速率之间。同时该段

管道附近埋设了自腐蚀试片,通过测量试片失重计算其自腐蚀速率为 0.019 5 mm/a,可知该段管道的腐蚀速率低于 0.025 mm/a 的判别指标。假设电流方向为流出试片,则依据第 2.4 节介绍的法拉第定律相关公式计算腐蚀速率。

表 4 试片电流方向测试		
Table 4 Detection of coupon current direction		
监测点	试片电流方向	预测腐蚀速率 $Y/(mm \cdot a^{-1})$
1	流入试片	$0 \leq Y < 0.019\ 5$
2	流入试片	$0 \leq Y < 0.019\ 5$
3	流入试片	$0 \leq Y < 0.019\ 5$
4	流入试片	$0 \leq Y < 0.019\ 5$
5	流入试片	$0 \leq Y < 0.019\ 5$

对 5 个监测点试片的断电电位进行检测,结果如图 6 所示,由此可知该管道的整体阴极保护有效。基于以上分析,可以初步判断该管道的腐蚀风险综合评价为“低”。

5 结 论

(1)设计了一套柔性环绕式的管道腐蚀参数检测装置,包含高纯锌参比电极、测试试片、连接带等,形成了具体的安装布设方式及电路连接方式。结合配套的地面测试桩,可便捷地测试相关电位及电流,满足了顶管管道腐蚀风险评价的数据需求。

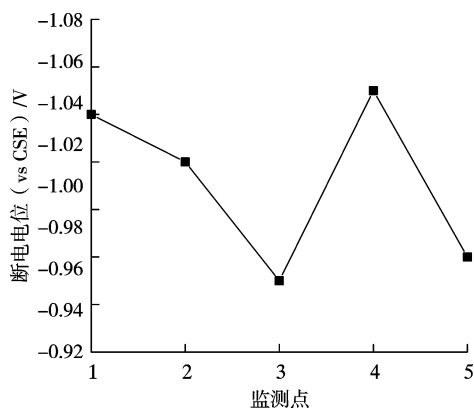


图6 试片断电电位检测

Fig. 6 Detection of coupon off-potential

(2)建立了具体的数据获取及分析计算方法,包括基于电流-电位法的防腐层面电阻率计算、基于密间隔电位(CIPS)的防腐层破损点判断、基于电流趋势的牺牲阳极性能诊断、基于试片电流密度的腐蚀速率预测等,为顶管管道的腐蚀风险评价提供数据支撑。

(3)形成了防腐层面电阻率、破损点、牺牲阳极性能、阴极保护效果、腐蚀速率等单项风险评价方法,构建了顶管管道局部监测点及整体管段的腐蚀风险综合评价体系,对于管道的腐蚀风险的预防性管理有一定指导意义。

[参 考 文 献]

- [1] 韩旭.顶管施工技术在城镇燃气管道建设中的应用研究[D].北京:北京建筑大学,2018.
HAN X. Application of pipe jacking technology in urban gas pipeline construction[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018.
- [2] 陈冬辉.浅谈城市燃气管道顶管施工应注意的几个问题[J].江西建材,2016,191(14):85-86.
CHEN D H. Discussion on Several Problems in Pipe Jacking Construction of City Gas Pipeline[J]. Jiangxi Building Materials, 2016, 191(14): 85-86.
- [3] 焦琳,侯利华.水平定向钻和顶管法在管道穿越铁路的比较[J].煤气与热力,2012, 32(12):33-35.
JIAO L, HOU L H. Comparison between Horizontal Directional Drilling and Pipe Jacking in Pipeline Crossing Railway[J]. Gas and Heat, 2012, 32(12): 33-35.
- [4] GB/T 50423-2013,油气输送管道穿越工程设计规范[S].
GB/T 50423-2013, Code for design of oil and gas transmission pipeline crossing engineering[S].
- [5] 张延丰.套管穿越处的阴极保护[J].石油化工腐蚀与防护,2000, 17(4):45-47.

ZHANG Y F. Cathodic protection at casing crossing [J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 2000, 17(4): 45-47.

- [6] SONG F M. Statistical analysis of external corrosion anomaly data of cased pipe segments: NACE Corrosion Conference [C]. Houston: NACE, 2009.
- [7] 李志宏,韩建彬,莫诚生,等.城市天然气埋地高压管道非开挖检验[J].中国特种设备安全,2007, 24(4):24-26.
LI Z H, HAN J B, MO C S, et al. Trenchless inspection of urban natural gas buried high-pressure pipeline[J]. Safety of China Special Equipment, 2007, 24(4): 24-26.
- [8] 蒋卡克.埋地油气管道套管设计及选材边界技术[J].上海煤气,2020(4):12-15.
JIANG K K. Casing design and material selection boundary technology of buried oil and gas pipeline [J]. Shanghai Gas, 2020(4): 12-15.
- [9] 刘波,杨燕,王树立,等.套管中主管道的腐蚀与防护研究进展[J].常州大学学报,2015, 27(4):59-62.
LIU B, YANG Y, WANG S L, et al. Research progress on corrosion and protection of main pipe in casing [J]. Journal of Changzhou University, 2015, 27(4): 59-62.
- [10] 伏喜斌.埋地燃气钢质管道顶管段非开挖检验技术研究[J].管道技术与设备,2017(6):38-43.
FU X B. Research on trenchless inspection technology for pipe jacking section of buried gas steel pipeline [J]. Pipeline Technology and Equipment, 2017(6): 38-43.
- [11] 崔伟.管道穿越段防腐层质量和阴极保护效果评估[J].油气储运,2020,39(11):1304-1309.
CUI W. Evaluation of anticorrosive coating quality and cathodic protection effect of pipeline crossing section [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2020, 39(11): 1304-1309.
- [12] 张玉星,邢琳琳,王一君,等.城镇燃气钢质管道腐蚀原因与对策研究[J].城市燃气,2019,537(11):22-25.
ZHANG Y X, XING L L, WANG Y J, et al. Study on corrosion causes and countermeasures of urban gas steel pipeline [J]. Urban Gas, 2019, 537(11): 22-25.

[编校:宋媛]

欢迎赐稿!

欢迎订阅!

欢迎刊登广告!