

管道交流干扰腐蚀风险识别方法研究

孟祥岩, 李磊, 李祥琦, 梅安, 孙大明

(国家管网集团北京管道有限公司河北输油气分公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: **目的** 提出一种判别交流干扰腐蚀风险的方法。**方法** 根据现场测试参数、土壤理化性质参数及室内模拟腐蚀试验, 运用灰色关联分析和三角模糊层次分析, 将长输油气管道沿线土壤环境和沿线阴极保护状态等因素与交流干扰腐蚀相结合, 确定影响交流干扰腐蚀各关键因素的贡献权重。**结果** 参考现行土壤腐蚀性以及交流干扰评价的标准, 将土壤腐蚀性、交流干扰电流密度、防腐层破损面积以及运行年限进行综合考虑, 建立了一种融合交流干扰及土壤腐蚀性评价的交流干扰腐蚀风险识别方法。**结论** 通过现场应用, 该方法评价结果与管道内检测结果一致。

关键词: 安全; 交流干扰腐蚀; 腐蚀风险评价; 灰色关联分析; 三角模糊层次分析; 管道

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)03-0132-09

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2023.03.017

Identification Method of AC Interference Corrosion Risk of Pipeline

MENG Xiang-yan, LI lei, LI Xiang-qi, MEI An, SUN Da-ming

(Hebei Oil and Gas Transport Branch, Beijing Pipeline Co., Ltd., State Pipe Network Group,
Hebei Qinhuangdao 066000, China)

ABSTRACT: The work aims to put forward a method for AC interference corrosion risk assessment. According to field test parameters, physical and chemical property parameters of soil and corrosion test results, GRA and FAHP were used to combine the soil environment and the cathodic protection state along the oil and gas pipelines with the corrosion rate of AC interference. The contribution weight of each key factor affecting AC interference corrosion was determined. Referring to the current standards of soil corrosivity and AC interference assessment and comprehensively considering soil corrosivity, AC interference current density, damaged area of coating and operation life, an AC interference corrosion risk identification method integrating AC interference and soil corrosivity assessment was established. Its application on site shows that the assessment results of this method are consistent with the internal detection results of pipelines.

KEY WORDS: safety; AC interference corrosion; corrosion risk assessment; GRA; FAHP; pipeline

收稿日期: 2022-05-13; 修订日期: 2022-07-05

Received: 2022-05-13; Revised: 2022-07-05

作者简介: 孟祥岩 (1978—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为油气储运安全。

Biography: MENG Xiang-yan (1978-), Male, Senior engineer, Research focus: safety of oil and gas storage and transportation.

通讯作者: 李磊 (1986—), 男, 工程师, 主要研究方向为管道的腐蚀与防护。

Corresponding author: LI Lei (1986-), Male, Engineer, Research focus: pipeline corrosion and protection.

引文格式: 孟祥岩, 李磊, 李祥琦, 等. 管道交流干扰腐蚀风险识别方法研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(2): 132-140.

MENG Xiang-yan, LI lei, LI Xiang-qi, et al. Identification Method of AC Interference Corrosion Risk of Pipeline[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(2): 132-140.

近年来,我国交流输电线路、交流电气化铁路与输油输气管道的建设都在迅速发展,而交流输电线路和交流电气化铁路与油气管道接近或交叉的情况也经常出现,引起埋地管道的交流干扰问题^[1-2]。从工程技术应用的角度考虑,国内外制定了许多标准,GB/T 50698—2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》中要求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 时,采用交流电流密度进行评估交流干扰程度。D-CEN/TS 15280—2006 “Evaluation of AC Corrosion Likelihood of Buried Pipelines” 中采用了交直流电流密度比评价交流腐蚀的可能性。GB/T 40377—2021《金属和合金的腐蚀 交流腐蚀的测定 防护准则》和 ISO 18086—2019 “Corrosion of Metals and Alloys-Determination of AC Corrosion-Protection Criteria” 中提出了在具有阴极保护条件下交流干扰的可接受水平。同时杂散电流腐蚀与土壤腐蚀性密切相关。土壤含水是造成土壤腐蚀的必要条件^[3],土壤中的硫酸根离子、氯离子等对金属材料的腐蚀影响较大^[4-6]。同时,钢的腐蚀速率与不同 pH 下的阴极过程有关^[7]。埋地管道受到杂散电流干扰时会使得管道电位产生偏移,当管道的电位负于管线钢的析氢电位时,会析出氢气,对微观结构上的金属材料造成破坏,在酸性土壤中由杂散电流造成的析氢腐蚀会更为严重。丁清苗等^[8]、韦博鑫等^[9]、Tang 等^[10]、Du 等^[11]研究发现,交流杂散电流对管线钢在土壤模拟溶液中的腐蚀起促进作用。有研究表明,对管线施加阴极保护,会使得电化学腐蚀的阳极溶解过程得到有效抑制^[12-20]。因此,需要在现场测试交流干扰电流密度、土壤电阻率、阴极保护电位等参数,对土壤理化性质进行分析。丁海峰等^[21]、尹宗明等^[22]、马军鹏等^[23]、江世艳等^[24]提出了灰色关联分析算法,分析了各个因素与目标因素的关联性。李军等^[25]、肖逸璇等^[26]、隋明刚等^[27]、Tang 等^[28]、Zeng 等^[29]、Chen 等^[30]提出利用三角模糊层次分析 (FAHP),将评价方法由刚性评价转换成弹性评价。现行交流干扰防护及评价标准在现场工程实践中具有易于实行的优点,但长期以来埋地管道交流腐蚀的评价均通过现场测试取得的交直流参数进行评价。国内外多条管道已发生在较低交流干扰电压的情况下产生腐蚀穿孔和壁厚减薄的情况^[31]。因为交流腐蚀不仅受到交流干扰电压/交流干扰密度的影响,还与周围土壤腐蚀性离子种类及含量、防腐层缺陷面积大小等因素有关,单纯采用交流干扰电压/交流电流密度的指标作为交流干扰腐蚀风险的判断容易导致误判。

本文基于现场测试参数、理化性质参数与室内腐蚀试验结果,利用灰色关联分析和三角模糊层次分析,将交流干扰腐蚀速率及影响因素相结合,计算出室内条件下交流干扰腐蚀各因素的权重。在此基础

上,构建一种考虑阴极保护状况并融合土壤腐蚀性的交流干扰腐蚀风险识别方法,提高交流干扰腐蚀风险评估的准确性,并为埋地管道的交流干扰腐蚀防护提供指导建议。

1 风险识别方法建立

1.1 高压交流腐蚀关键因素识别

由于交流干扰腐蚀与阴极保护电位、交流电流密度、土壤电阻率和理化性质等因素有关,因此需要对现场参数进行测试。主要测试参数由现场测试的阴极保护电位、交流电流密度、土壤电阻率、室内土壤理化性质试验测得的土壤中各离子浓度和含水率等参数组成。各参数测量方法:阴极保护电位测量根据 GB/T-21246《埋地钢质管道阴极保护参数测量方法》进行测量,土壤电阻率按照 SY/T-0023《埋地钢质管道阴极保护参数测试方法》进行测量,交流干扰电位/电流密度按照 GB/T 50698—2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》进行测量,土壤理化性质根据 NY/T 1121—2006《土壤检测系列标准》进行检测。

根据现场测试结果,设计室内试验方案。将交流干扰腐蚀速率作为目标层;因素层是影响目标层的一级指标,由干扰电位/干扰电流密度、阴极保护电位、pH 值、碳酸氢根、碳酸根、硫酸根及氯离子含量等 7 个因素组成,其中阴极保护电位参数是相较于饱和硫酸铜参比电极确定的;数值层是因素层的具体取值,基于此,构建室内单因素变量试验方案,如图 1 所示。

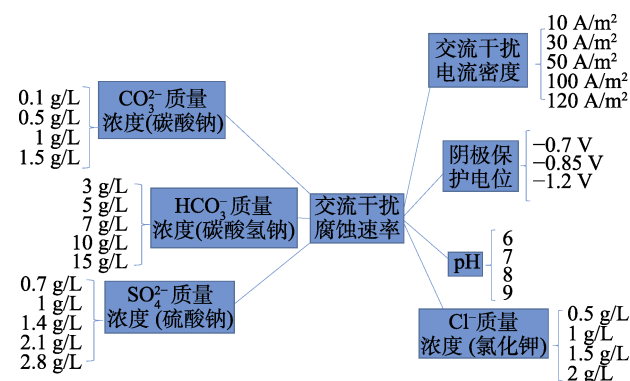


图 1 室内试验方案

Fig.1 Laboratory experiment scheme

根据图 1 的室内单因素变量试验方案,进行 28 组试验。试片规格参照 SY/T 0029—2012《埋地钢质检查片应用技术》。选用 KCl、NaHCO₃、MgSO₄·7H₂O、Na₂CO₃ 等试剂配制模拟溶液,采用氨水和醋酸调节 pH,试验周期为 72 h。先通入直流阴极保护 15 min 后,再通入交流干扰电流 72 h。试验后,取出试片,按照 GB/T 16545 进行酸洗,去除腐蚀产物,干燥后

称量，计算腐蚀速率。

采用灰色关联分析法的思路可以量化交流干扰腐蚀速率与其各个影响因素之间的关联性。基于灰色关联分析的结果，在 FAHP 构造判断矩阵时，摒弃了传统的 1~9 标度法，采用三角模糊数，降低判断矩阵的主观性。根据 FAHP 方法的相关公式进行计算，得到各个影响因素对交流腐蚀的贡献权重。

1.2 腐蚀严重管段识别方法

目前国内外许多研究倾向于多项指标综合评价土壤腐蚀性，其中最具有代表性的是德国的 Baeckman 综合评分指标和美国的 ANSI-A21.5 土壤腐蚀性评价法，可以得到各项指标对土壤腐蚀性的贡献权重。土壤腐蚀性对交流干扰腐蚀的重要性是不可忽略的，根据交流腐蚀关键因素识别结果，可以得出部分土壤腐蚀性指标对交流干扰腐蚀的权重。综合考虑现场实际情况和交流腐蚀关键因素识别结果，选取关键因素识别研究的 7 种因素（按贡献权重排序后）中有关土壤腐蚀性的前 3 项，作为腐蚀严重管段识别土壤腐蚀性评价中的部分评价指标，并结合含水率和含盐总量作为整体土壤腐蚀性对交流干扰腐蚀的评价指标。依此 2 部分权重进行归一化，最终得到交流干扰下土壤腐蚀性各指标的贡献权重。

将土壤环境因素指标以及阴极保护电位，作为对交流干扰腐蚀的间接影响因素；将埋地管道上感应出的交流干扰电流视为交流干扰腐蚀的直接影响因素；将防腐层破损情况作为交流干扰腐蚀的先决性因素。将直接因素、间接因素和先决性因素耦合，基于此思想建立腐蚀严重管段识别方法。由于室内试验设备因素限制，本次试验没有制作模拟防腐层破损试片，但通过参考 SY/T 0087.1—2018《钢质管道及储罐腐蚀评价标准》、GB/T 19285—2016《埋地钢质管道腐蚀防护工程检验》、管道风险管理手册（Kent 第二版）等相关规范中，防腐层破损面积对管道造成的腐蚀风险评分内容，基于本文评价方法的构造思想，将防腐层破损因素融合进评价方法中。

2 结果与讨论

2.1 交流干扰腐蚀关键因素识别结果

现场及室内土壤理化性质分析结果见表 1 和 2。

根据表 1 和 2 所得的现场测试数据和土壤理化性质分析数据，构建室内试验方案。考虑的交流干扰电流密度、阴极保护电位、土壤电阻率、土壤腐蚀性离子等因素的试验参数取值范围可以覆盖测试数据区间，室内试验结果见表 3。

根据室内试验结果，采用 MATLAB 编写灰色关联分析计算程序，计算得到各因素关联度结果，见表 4。

为实现判断矩阵三角模糊数中值的定量选取，根据关联度数值两两比较，确定比值范围及比值范围对应的三角模糊数中心值 m 的取值，具体取值原则见表 5。

表 1 现场测试结果

Tab.1 Field test results

测试桩	$\rho/(\Omega \cdot m)$	V_{AC}/V	$J_{AC}/(A \cdot m^{-2})$	V_{off}/V
YQP-928	15.07	0.59	0	-1.15
YQP-998	27.63	2.2	3.56	-0.93
YQP-1071	27.63	1.52	0	-1.26
YQP-1074	32.66	4.31	15.19	-1.19
YQP-1077	17.58	3.74	10.34	-0.95
YQP-1090	37.68	4.32	4.02	-1.17
YQP-1095	75.36	4.85	0	-1.19
YQP-1103	21.35	3.81	12.06	-1.17
YQP-1105	26.38	6.25	4.65	-1.12
YQP-1113	188.4	11.06	18.48	-0.99
LtL-72	15.07	0.33	6.75	-1.16
LtL-131	13.82	11.54	7.32	-0.95
LtL-154	3.77	0.2	1.68	-1.20
LtL-165	6.28	0.18	0	-1.27
LtL-184	12.56	0.62	6.88	-1.05
LtL-195	11.3	0.74	8.04	-1.30
LtL-199	15.07	1.7	6.8	-0.98
LtL-231	46.47	2.23	8.79	-1.00
LtL-233	38.94	2.68	12.06	-1.01
LtL-240	42.7	2.65	9.34	-1.04

根据上述规则，以 1~9 标度法为原则构造因素层三角模糊判断中值矩阵 M ：

$$M = \begin{bmatrix} 1.00 & 2.50 & 2.70 & 2.60 & 1.00 & 1.70 & 2.60 \\ 0.40 & 1.00 & 1.50 & 1.50 & 0.40 & 0.67 & 1.00 \\ 0.37 & 0.67 & 1.00 & 1.00 & 0.40 & 0.67 & 1.00 \\ 0.38 & 0.67 & 1.50 & 1.00 & 0.40 & 0.67 & 1.00 \\ 1.00 & 2.50 & 1.70 & 1.50 & 1.00 & 1.50 & 2.50 \\ 0.59 & 1.50 & 1.00 & 1.50 & 0.67 & 1.00 & 1.00 \\ 0.38 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.40 & 0.67 & 1.00 \end{bmatrix}$$

根据三角模糊判断矩阵 A 得出判断中值矩阵 M 。计算中值矩阵 M 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 。将 $\lambda_{\max}$ 代入公式进行一致性检验。经计算此中值矩阵通过一致性检验。

根据公式计算调整判断矩阵 Q ，并将矩阵 Q 对角线归一化后得到 Q' 。

$$Q' = \begin{bmatrix} 1.0000 & 2.1793 & 2.7593 & 2.5089 & 1.2051 & 1.8170 & 2.5872 \\ 0.4589 & 1.0000 & 1.2661 & 1.1512 & 0.5530 & 0.8338 & 1.1872 \\ 0.3624 & 0.7898 & 1.0000 & 0.9093 & 0.4368 & 0.6585 & 0.9376 \\ 0.3986 & 0.8686 & 1.0998 & 1.0000 & 0.4803 & 0.7242 & 1.0312 \\ 0.8298 & 1.8083 & 2.2896 & 2.0819 & 1.0000 & 1.5077 & 2.1468 \\ 0.5504 & 1.1994 & 1.5186 & 1.3808 & 0.6632 & 1.0000 & 1.4239 \\ 0.3865 & 0.8423 & 1.0665 & 0.9698 & 0.4658 & 0.7023 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

表 2 土样理化性质分析结果
Tab.2 Results of physical and chemical property analysis of soil

测试桩号	pH	各离子质量浓度/(g·kg ⁻¹)				含盐量/%	含水率/%
		CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻		
YQP-928	6.52	0	0.976	0.141 8	0.379 2	0.40	14.30
YQP-998	6.53	0	0.732	0.567 2	0.259 2	0.20	6.15
YQP-1071	6.83	0	0.488	0.283 6	0.283 2	0.30	8.00
YQP-1074	6.42	0	0.488	0.283 6	0.292 8	0.50	9.74
YQP-1077	6.59	0	0.488	0.141 8	0.291 7	0.30	32.2
YQP-1090	7.22	0	0.976	0.425 4	0.297 6	0.20	7.62
YQP-1095	6.81	0	7.320	0.567 2	0.273 6	0.10	4.70
YQP-1103	5.90	0	0.976	0.567 2	0.331 2	0.20	9.86
YQP-1105	6.46	0	0.976	0.709	0.326 4	0.20	12.20
YQP-1113	6.74	0	0.488	0.425 4	0.364 8	0.40	11.06
LtL-0005	8.43	0.121	0.415	0.113	0.576	0.089	13.71
LtL-0017	8.04	0	0.384	1.531	0.451	0.105	9.75
LtL-0033	8.11	0.096	0.293	0.851	0.441	0.296	8.74
LtL-0072	8.11	1.272	0.732	5.586 9	0.484 8	2.70	17.96
LtL-0154	7.37	0	1.464	0.425 4	0.331 2	0.10	21.32
LtL-0165	7.48	0	4.880	0.567 2	0.302 4	0.60	13
LtL-0184	7.86	0	0.488	0.496 3	0.408 0	0.20	19.10
LtL-0195	7.15	0	12.20	0.567 2	0.552 0	0.60	26.88
LtL-0199	7.40	0	0.488	0.567 2	0.465 6	0.70	17.10
LtL-0231	7.81	0	0.976	0.283 6	0.254 4	0.10	6.18
LtL-0233	7.23	0	1.952	0.992 6	0.364 8	0.10	12.32
LtL-0240	6.84	0	0.488	0.354 5	0.321 6	0.10	13.70

用方根法计算各项指标权重,得到因素层对于目标层的权重,见表 6。

2.2 腐蚀严重管段识别方法及其应用

根据腐蚀严重管段识别方法的建立思想,建立如下的评价体系:

$$S = A(S_{CP}, S_{soil,i}) \cdot S_{AC} S_{coat}$$

式中: S 为总评价分数; A 为各指标权重系数; S_{CP} 为阴极保护评价分数; $S_{soil,i}$ 为土壤腐蚀评价各指标分数; S_{AC} 为交流干扰评价分数; S_{coat} 为防腐层评价分数。

参考相关规范,将 0.4、1、10 cm² 作为防腐层评价分数的划分界限。结合得出的权重关系,建立交流干扰下埋地管道腐蚀风险识别方法。针对构造出的评分公式,为了消除乘法的放大敏感影响,将评分公式转化成对数合成,使得评价值的极差缩小。

对上述总评分式进行对数变换,令 $S' = \lg S$, 得:

$$S' = \lg S_{AC} + \lg S_{coat} + \lg [A(S_{CP}, S_{soil,i})]$$

根据埋地管道的浴盆曲线可知,当设计寿命为 30 a 的管道服役 25 a 后,进入事故频发阶段,因此提出运行年限参数,对受交流干扰严重管段评分进行修正。考虑管道服役的时间效应,得到如下评分式:

表 3 不同腐蚀环境因素下 X70 管线钢母材的腐蚀速率数据
Tab.3 Corrosion rate of X70 pipeline steel base material under different corrosion environment

阴极保护电位/V	交流电流密度/(A·m ⁻²)	pH	各化合物质量浓度/(g·L ⁻¹)				腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)
			碳酸钠	碳酸氢钠	氯化钾	硫酸钠	
-0.7	100	7	0.5	7	1	1	0.513
-0.85	100	7	0.5	7	1	1	0.401
-1.2	100	7	0.5	7	1	1	0.433
-0.85	10	7	0.5	7	1	1	0.002
-0.85	30	7	0.5	7	1	1	0.008
-0.85	50	7	0.5	7	1	1	0.079
-0.85	100	7	0.5	7	1	1	0.411
-0.85	120	7	0.5	7	1	1	0.539
-0.85	100	6	0.5	7	1	1	0.156
-0.85	100	7	0.5	7	1	1	0.403
-0.85	100	8	0.5	7	1	1	0.279
-0.85	100	9	0.5	7	1	1	0.036
-0.85	100	7	0.1	7	1	1	0.071
-0.85	100	7	0.5	7	1	1	0.070
-0.85	100	7	1	7	1	1	0.170
-0.85	100	7	1.5	7	1	1	0.084
-0.85	100	7	0.5	3	1	1	0.023
-0.85	100	7	0.5	5	1	1	0.054
-0.85	100	7	0.5	10	1	1	0.029
-0.85	100	7	0.5	15	1	1	0.033
-0.85	100	7	0.5	7	0.5	1	0.177
-0.85	100	7	0.5	7	1	1	0.246
-0.85	100	7	0.5	7	1.5	1	0.563
-0.85	100	7	0.5	7	2	1	0.534
-0.85	100	7	0.5	7	1	0.7	0.282
-0.85	100	7	0.5	7	1	1.4	0.310
-0.85	100	7	0.5	7	1	2.1	0.280
-0.85	100	7	0.5	7	1	2.8	0.297

表 4 灰关联分析方法运算结果
Tab.4 Results of GRA

研究因素	阴极保护电位	交流电流密度	pH	碳酸根离子	碳酸氢根离子	氯离子	硫酸根离子
关联度	0.621 5	0.721	0.622 0	0.603	0.611 8	0.725 1	0.668 9

表 5 三角模糊数中心值 *m* 的取值参照
Tab.5 Reference value of triangular fuzzy number center value *m*

两因素关联系数比值	(1,1.1)	[1.1,1.2)	[1.2,1.3)	[1.3,1.5)	[1.5,2)	[2,3)	[3,4)	[4,+∞)
<i>m</i> 取值	[1,2)	[2,3)	[3,4)	[4,5)	[5,6)	[6,7)	[7,8)	[8,9]

表 6 因素层对于目标层的权重排序
Tab.6 Contribution weight of factor layer for target layer

因素	干扰电流密度	氯离子	阴极保护电位	硫酸根离子	pH	碳酸氢根离子	碳酸根离子
权重	0.23	0.2	0.14	0.13	0.13	0.09	0.08

$S'' = S' \cdot T$

式中： T 为运行年限。

对 S'' 代表总评分式构成的高压交流干扰下的埋地管道风险识别分值见表 7—9。

表 7 土壤腐蚀性评价
Tab.7 Soil corrosivity assessment

参数	测量结果	分值
pH	(7, 9]	1
	(6.5, 7]	4
	(6, 6.5]	7
	≤6	10
Cl ⁻ 质量分数/%	≤0.005	1
	(0.005, 0.01]	4
	(0.01, 0.1]	7
	>0.1	10
SO ₄ ²⁻ 质量分数/%	≤0.005	1
	(0.005, 0.01]	4
	(0.01, 0.1]	7
	>0.1	10
可溶盐质量分数/%	≤0.05	1
	(0.05, 0.1]	4
	(0.1, 0.75]	7
	>0.75	10
含水量/%	(3, 7]或>40	1
	(7, 10]或(30, 40]	4
	(10, 12]或(25, 30]	7
	(12, 25]	10

表 8 干扰因素评价
Tab.8 Interference factor assessment

测量参数	测量结果	分值
阴极保护 电位/V	[-0.85, -1.2]	1
	(-1.2, -1.5]	4
	(自然电位~-0.85)	7
	无阴极保护	10
交流干扰电流 密度/(A·m ⁻²)	≤30	1
	(30, 60]	4
	(60, 100]	7
	>100	10
防腐层破损 面积/cm ²	≤0.4	1
	>10	4
	(0.4, 1]	7
	(1, 10]	10
运行年限	运行年限为设计寿命 80%	1
	运行年限为设计寿命 80%~90%	1.1
	运行年限为设计寿命 90%以上	1.15

表 9 交流干扰腐蚀风险评价
Tab.9 Corrosion risk assessment of AC interference

	分值	交流干扰腐蚀风险评价结果
总评分	(0, 1.8]	低
	(1.8, 2.5]	中
	>2.5	高

根据交流干扰腐蚀关键因素识别结果,以及构建的风险评价方法,对现场工作提出以下建议:针对土壤腐蚀性参数,YQP-1103、YQP-1105 测试桩土壤 pH 值小于 6.5, LtL-0072、LtL-0154 测试桩氯离子或者硫酸根离子的质量分数大于 0.01%, LtL-0072 测试桩可溶盐总质量分数大于 0.75%, YQP-928、YQP-1103、YQP-1105 以及 LNG 管道沿海地段的测试桩土壤含水率在 10%~30%,需要重点关注。

以华北某 LNG 管道中 LtL-154 测试桩处进行实施例评价。根据埋片时现场实测数据和室内土壤理化性质分析得到:阴极保护电位为-1.2 V,交流干扰电流密度为 1.68 A/m²,pH 值为 7.37,氯离子质量分数为 0.042 5%,硫酸根离子质量分数为 0.033 1%,含盐量为 0.1%,含水率为 21.32%,防腐破损面积为 6.5 cm²。该 LNG 管道设计使用寿命 30 a,在 2013 年 11 月投产运行后,运行年限处在设计寿命的 80%以内。根据表 7—9 可得各因素的评价得分,见表 10、11。

表 10 阴极保护及土壤腐蚀性评价得分
Tab.10 Assessment score of cathodic protection and soil corrosivity

评价指标	指标数值	评价得分	权重值
阴极保护电位	-1.2 V	1	0.2
pH	7.37	1	0.1
氯离子质量分数	0.042 5%	7	0.15
硫酸根离子质量分数	0.033 1%	7	0.1
含盐量	0.1%	4	0.15
含水率	21.32%	10	0.2

表 11 干扰因素评价得分
Tab.11 Assessment score of interference factor

评价指标	指标数值	评价得分
交流干扰电流密度	1.68 A/m ²	1
防腐层破损面积	6.5 cm ²	10

考虑运行年限对评价分数的修正作用,最终综合评价评分为 1.67。根据表 9 可得,该 LNG 管道中 LtL-184 测试桩处交流干扰腐蚀风险低。对上述提到的华北某 LNG 管道和某输气管道,选取部分测试桩位置运用建立的方法进行风险识别,结果见表 12。对华北某输气管道和某 LNG 管道,根据 2 条管道内检测报告数据可得到,在管道上所选取的所有测试点

表 12 各参数得分以及风险识别结果
Tab.12 Scores of each parameter and results of risk identification

测试桩	pH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	含盐量	含水率	阴极保护电位	交流电流密度	风险等级
YQP-928	4	7	7	7	10	1	1	低
YQP-998	4	7	7	7	1	1	1	低
YQP-1071	4	7	7	7	4	4	1	低
YQP-1074	7	7	7	7	4	1	1	低
YQP-1077	4	7	7	7	4	1	1	低
YQP-1090	1	7	7	7	4	1	1	低
YQP-1095	4	7	7	4	1	1	1	低
YQP-1103	10	7	7	7	4	1	1	低
YQP-1105	7	7	7	7	10	1	1	低
YQP-1113	4	7	7	7	7	1	1	低
LtL-0072	1	10	7	10	10	1	1	低
LtL-0154	1	7	7	4	10	1	1	低
LtL-0165	1	7	7	7	10	4	1	低
LtL-0184	1	7	7	7	10	1	1	低
LtL-0195	1	7	7	7	7	4	1	低
LtL-0199	1	7	7	7	10	1	1	低
LtL-0231	1	7	7	4	1	1	1	低
LtL-0233	1	7	7	4	10	1	1	低
LtL-0240	4	7	7	4	10	1	1	低

处,管道均没有外部缺陷,管道外壁均没有明显减薄,可认为所有测试点处交流干扰腐蚀风险均为低,内检测结果与评价结果一致。

3 结论

本文将灰色关联分析和三角模糊层次分析相结合,确定了各个交流干扰腐蚀影响因素的贡献权重,并构建了一种长输管道在高压交流干扰下的腐蚀风险识别方法。

1) 交流干扰电流密度、阴极保护电位、pH、土壤含水率、含盐量、氯离子和硫酸根离子含量是高压交流干扰条件下影响管道腐蚀的关键因素。

2) 根据构建的评价方法,应重点关注 YQP-1103、YQP-1105、LtL-0072、LtL-0154 等测试桩位置,并对其进行持续监测。

3) 建立了一种融合土壤腐蚀性的交流干扰腐蚀风险识别方法,并在现场 2 条管道进行了应用,交流干扰腐蚀识别风险均为低,识别结果与内检测结果有很好的一致性。

参考文献:

- [1] JONES D, DAWSON J. Risk Assessment Approach to Pipeline Life Management[J]. Pipes and Pipelines International, 1998, 43(1): 5-18.
- [2] NIELSEN L V, GALSGAARD F. Sensor Technology for on-Line Monitoring of AC-Induced Corrosion along Pipelines[C]// Corrosion 2005. Houston: NACE, 2005: 05375.
- [3] 王光雍. 自然环境的腐蚀与防护: 大气·海水·土壤[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997: 239-276.
- [4] WANG Guang-yong. Corrosion and Protection of Natural Environment: Atmosphere, Seawater and Soil[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1997: 239-276.
- [5] 秦晓霞. 埋地管道土壤腐蚀性与防护研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009: 7-13.
- [6] QIN Xiao-xia. Research on Soil Corrosion and Protection of Pipeline[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009: 7-13.
- [7] 邓祖宇. H₂S 薄层液膜下 X70 钢的腐蚀电化学行为[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(6): 557-561.
- [8] DENG Zu-yu. Electrochemical Behavior of Corrosion of X70 Steel under Thin Layer of Electrolytes Containing Hydrogen Sulfide[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(6): 557-561.
- [9] RYAKHOVSKIKH I V, BOGDANOV R I, IGNATENKO V E. Intergranular Stress Corrosion Cracking of Steel Gas Pipelines in Weak Alkaline Soil Electrolytes[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 94: 87-95.
- [10] 陈敬友, 陈超, 吴迪, 等. 接地网腐蚀性评价方法与腐蚀速率预测[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(3): 64-67.
- [11] CHEN Jing-you, CHEN Chao, WU Di, et al. Corrosion Evaluation Method and Corrosion Rate Prediction of Grounding Grid[J]. Corrosion & Protection, 2021, 42(3): 64-67.
- [12] 丁清苗, 秦永祥, 崔艳雨, 等. 交流杂散电流对剥离涂层下 X80 钢腐蚀行为研究[J]. 钢铁研究学报, 2021,

- 33(6): 503-514.
- DING Qing-miao, QIN Yong-xiang, CUI Yan-yu, et al. Effect of AC Stray Current on Corrosion Behavior of X80 Steel under Stripped Coating[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(6): 503-514.
- [9] 韦博鑫, 许进, 高立群, 等. 交流杂散电流对 X80 管线钢的腐蚀行为影响[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 21-27.
- WEI Bo-xin, XU Jin, GAO Li-qun, et al. Effect of AC Stray Current on Corrosion Behavior of X80 Pipeline Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(4): 21-27.
- [10] TANG D Z, DU Y X, LU M X, et al. Effect of AC Current on Corrosion Behavior of Cathodically Protected Q235 Steel[J]. Materials and Corrosion, 2015, 66(3): 278-285.
- [11] DU Yan-xia, XIAO Ying-wu, XIE Si-li, et al. Research on the Effects of Environmental Parameters on AC Corrosion Behavior[C]//Corrosion 2018. Houston: NACE, 2018: 10676.
- [12] NIELSEN L. Role of Alkalization in AC Induced Corrosion of Pipelines and Consequences Hereof in Relation to CP Requirements[C]//Corrosion 2005. Houston: NACE, 2005: 05188.
- [13] 张伟, 张元盛, 韩冰, 等. 深水导管架平台外加电流阴极保护优化设计 I: 单座辅助阳极[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 82-94.
- ZHANG Wei, ZHANG Yuan-sheng, HAN Bing, et al. Optimization Design of Impressed Current Cathodic Protection for Offshore Oil Jacket Platform I: Single Seat Auxiliary Anode[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 82-94.
- [14] WANG Hui-ru, DU Cui-wei, LIU Zhi-yong, et al. Effect of Alternating Current on the Cathodic Protection and Interface Structure of X80 Steel[J]. Materials, 2017, 10(8): 851.
- [15] 封加全, 张学辉, 宋世德, 等. 基于外加电流阴极保护法的 FPSO 保护方案[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 100-105.
- FENG Jia-quan, ZHANG Xue-hui, SONG Shi-de, et al. FPSO Protection Scheme Based on Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 100-105.
- [16] FU A Q, CHENG Y F. Effect of Alternating Current on Corrosion and Effectiveness of Cathodic Protection of Pipelines[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2012, 51(1): 81-90.
- [17] 闫茂成, 石薇, 王彬彬. 埋地阴极保护管线的交流干扰腐蚀[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 1-8.
- YAN Mao-cheng, SHI Wei, WANG Bin-bin. Research on AC Interference Corrosion of Buried Pipeline with Cathodic Protection[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(4): 1-8.
- [18] 陈振华, 程玉魁, 高俊涛, 等. 埋地钢质管道阴极保护电绝缘测试方法应用分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 28-32.
- CHEN Zhen-hua, CHENG Yu-kui, GAO Jun-tao, et al. Analysis on Application of Electric Insulation Testing of Cathodically Protected Underground Steel Pipelines[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(4): 28-32.
- [19] 杜晨阳, 曹备, 吴荫顺. 交流电干扰下-850 mV(CSE)阴极保护电位准则的适用性研究[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(9): 655-659.
- DU Chen-yang, CAO Bei, WU Yin-shun. Applicability of -850 mV(CSE) Cathodic Protection Potential Criterion under AC Interference Condition[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(9): 655-659.
- [20] 周冰, 赵玉飞, 张盈盈, 等. 在役海洋桩基平台牺牲阳极阴极保护数值模拟[J]. 装备环境工程, 2021, 18(1): 110-118.
- ZHOU Bing, ZHAO Yu-fei, ZHANG Ying-ying, et al. Numerical Simulation of Sacrificial Anode Cathodic Protection for Offshore Pile Foundation Platform in Service[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(1): 110-118.
- [21] 丁海峰, 高凯, 姜茂敏. 基于灰色关联模型的上海市卫生总费用影响因素分析[J]. 中国医疗管理科学, 2021, 11(3): 24-28.
- DING Hai-feng, GAO Kai, JIANG Mao-min. Influencing Factors for Shanghai's Total Healthcare Expenditure Based on the Grey Relational Model[J]. Chinese Journal of Medical Management Sciences, 2021, 11(3): 24-28.
- [22] 尹宗明, 杜学敏. 基于灰色关联分析的港口物流发展影响因素研究[J]. 物流工程与管理, 2021, 43(4): 14-16.
- YIN Zong-ming, DU Xue-min. Research on Influential Factors of Port Logistics Development Based on Grey Relational Analysis[J]. Logistics Engineering and Management, 2021, 43(4): 14-16.
- [23] 马军鹏, 段晓苏, 白晓航, 等. 基于灰色关联和 Apriori 算法的输气管道输差分析[J]. 石油管材与仪器, 2021, 7(5): 90-93.
- MA Jun-peng, DUAN Xiao-su, BAI Xiao-hang, et al. Transmission Difference Analysis of Gas Pipeline Based on Grey Correlation and Apriori Algorithm[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2021, 7(5): 90-93.
- [24] 江世艳, 王燕青, 徐越峰, 等. 基于灰色关联分析的电网安全事故关键致因分析[J]. 中国电力, 2021, 54(6): 168-174.
- JIANG Shi-yan, WANG Yan-qing, XU Yue-feng, et al. Investigation of Key Causes for Power Grid Safety Events Based on Grey Correlation Analysis[J]. Electric Power, 2021, 54(6): 168-174.
- [25] 李军, 刘杰, 杨梓辉. 基于三角模糊层次分析法的高原库区施工船舶安全预警系统的设计[J]. 上海海事大学学报, 2021, 42(1): 94-99.
- LI Jun, LIU Jie, YANG Zi-hui. Design of Safety Early Warning System for Construction Ships in Plateau Reservoir Area Based on Triangular Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2021, 42(1): 94-99.

- [26] 肖逸璇. 三角模糊数改进层次分析法评估直流配电网电压等级[D]. 太原: 山西大学, 2020.
XIAO Yi-xuan. Triangular Fuzzy Number Improved Analytic Hierarchy Process to Evaluate the Voltage Level of DC Distribution Network[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.
- [27] 隋明刚, 魏巍. Fuzzy AHP 中权重确定方法的探讨与改进[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2000, 23(3): 218-220.
SUI Ming-gang, WEI Yi. Discussion and Improvement on Calculating Quotient Using Fuzzy AHP[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2000, 23(3): 218-220.
- [28] 唐川, 宁成千, 张鹏, 等. 基于蒙特卡洛的模糊层次分析法在埋地管线腐蚀影响因素分析中的应用[J]. 全面腐蚀控制, 2009, 23(10): 16-19.
TANG Chuan, NING Cheng-qian, ZHANG Peng, et al. Application of FAHP Based on Monte Carlo in Evaluation of Corrosion Factors of Buried Pipeline[J]. Total Corrosion Control, 2009, 23(10): 16-19.
- [29] ZENG Wen, PAN Yong-ting, HUANG Hong-mei. Risk Analysis Model for Water Pipeline Leakage Based on FAHP and BPNN[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 441: 1093-1096.
- [30] CHEN Xue-feng, WU Zong-zhi, CHEN Wen-tao, et al. Selection of Key Indicators for Reputation Loss in Oil and Gas Pipeline Failure Event[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 99: 69-84.
- [31] 张合平. 埋地钢质管道交流腐蚀的评估与控制[J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32(11): 107-111.
ZHANG He-ping. Assessment and Control of Alternating Current Corrosion on Steel Pipelines[J]. Total Corrosion Control, 2018, 32(11): 107-111.

责任编辑: 刘世忠