

试验研究

DOI: 10.11973/fsyfh-201511001

油田埋地金属管道外腐蚀机理研究

陈艳华^{1,2}, 李六军¹, 李冬冬¹, 陈宇³, 于秀军³

(1. 河北联合大学 建筑工程学院, 唐山 063009; 2. 河北省地震工程研究中心, 唐山 063009;
3. 大庆油田有限责任公司 第九采油厂规划设计研究所, 大庆 163712)

摘要: 采用室内试验、现场验证和光谱分析相结合的方法, 以埋地金属管道的外腐蚀成因为切入点, 对北方盐碱土壤环境的腐蚀性进行研究。基于对油田现场土壤的理化试验结果, 确定关键因素, 以 9 种主要的土壤腐蚀影响因素为变量, 设计 9 因素 3 水平的室内腐蚀模拟正交试验。采用 20 号钢标准腐蚀试片, 进行模拟试验。并对试验结果进行方差分析, 研究了每个因素对土壤腐蚀速率的作用规律, 得到该区域土壤腐蚀因素的重要度次序由大到小为: Na^+ , 含水率, 温度, Ca^{2+} , 孔隙度, pH, SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- 。进一步对腐蚀产物主要成分进行光谱分析, 且与现场埋片腐蚀产物主要成分比较, 结果显示两者主要成分基本一致, 含量有所差别, 一定程度上验证了室内研究结果的可靠性。

关键词: 埋地管道; 土壤腐蚀; 影响因素; 正交试验; 方差分析; 光谱分析

中图分类号: TE988 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-748X(2015)11-1009-05

Research on External Corrosion Mechanism of Buried Metal Pipeline of Oilfield

CHEN Yan-hua^{1,2}, LI Liu-jun¹, LI Dong-dong¹, CHEN Yu³, YU Xiu-jun³

(1. College of Civil and Architecture Engineering Hebei United University, Tangshan 063009, China;
2. The Seismology Research Center of Hebei Province, Tangshan 063009, China;
3. Planning and Design Institute of No. 9 Oil Production Company, Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing 163712, China)

Abstract: Taking external corrosion of pipelines as a research point, laboratory test, site verification and spectral analysis were adopted to investigate the corrosion of saline-alkali soil environment in north China. Orthogonal simulation experiments with 9 factors and 3 levels were designed based on physical and chemical test results of local soil, taking 9 main corrosion factors as variables. Standard corrosion test slices of 20[#] steel were used to perform kinds of physical and chemical experiments for simulating local soil. Analysis of variance was done to these test results. The affecting rule on corrosion rate of soil was researched, and importance degree order of corrosion factors in this district was obtained, namely, Na^+ > moisture content > temperature > Ca^{2+} > porosity > pH value > SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^- . Furthermore, the main components of corrosion products were analyzed by X-ray fluorescence and compared with the corrosion products of site test slices. From these results, the main components of both corrosion products were consistent basically, but the contents were a bit different, which validates the reliability of laboratory test results to a certain extent.

Key words: buried metal pipeline; soil corrosion; influence factor; orthogonal experiment; analysis of variance; spectral analysis

我国各大油田所处地域广阔, 土壤环境各不相同, 即使同一油田同一采油厂的土壤也存在很大差

异。大庆油田龙虎泡作业区大多处于草地、低洼、沼泽等地带, 地质条件复杂, 且土壤多呈盐碱性, 环境多变较恶劣, 地下埋设的油、气、水管线达 2 500 km 以上^[1]。其埋地金属管道随着使用时间的延长, 由于土壤的腐蚀作用, 造成埋地管道防腐层老化损坏、管道老化, 直至穿孔。据统计, 腐蚀穿孔占管道穿孔的 96%。2005 年以来因腐蚀更新管道 300 多

收稿日期: 2014-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51318172); 河北省自然科学基金项目(E2014209089)

通信作者: 陈艳华(1972-), 教授, 博士, 从事地下生命线防灾减灾工作, 15033920209, cyh427@163.com

公里,投资上亿元^[2]。也就是说,环境因素,如温度、溶解氧含量等对埋地金属管道的电化学反应影响颇大^[3-4]。还有土壤类型、地下水位、土壤含水率等对埋地阴极保护管道的腐蚀同样具有很大影响^[5-6]。更有研究显示,盐碱性土壤中埋地金属管道会发生坑腐蚀^[7];土壤中的各类离子也影响着埋地钢管的腐蚀行为^[8]。然而,在众多影响因子中,每个因子对埋地管道腐蚀破坏影响重要度的大小各不相同,直接决定管道的破坏形式,并会影响防腐措施的具体实施。所以,对于复杂多变的土壤环境,有针对性地结合实际油田的具体土壤环境研究埋地金属管道的腐蚀机理更具现实意义。

本工作通过室内试验、光谱分析和现场验证等方法,首先确定影响腐蚀的主要因素,然后综合考虑土壤的含水率、孔隙度、温度、pH及土壤中 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 含量等9种因素,设计室内腐蚀模拟试验方案,对研究区域土壤环境因素的影响及重要度序进行深入分析与评价,并通过现场埋片试验验证室内试验结果的可靠性,为改善局部土壤环境提供理论依据。

1 试验

1.1 土壤理化试验与腐蚀影响因素确定

土壤因所处地理位置、地质条件、气候条件、周围环境条件等不同而具有不同的特性,如土壤酸碱性,土壤粘性,土壤含水,温度,孔隙,土壤阴阳离子含量等。这些不同的特性使得土壤表现出不同的腐蚀性,对埋入其内的金属管道产生不同程度的腐蚀破坏,进而影响油田正常的生产和集输,有些还会破坏环境,造成污染,影响人们的生活。所以分析土壤的理化性质,可为土壤腐蚀影响因素的确定奠定基础。

取大庆油田龙虎泡作业区现场土壤样品进行理

化试验,测得土壤物理特性如表1所示,阴阳离子含量结果如表2所示。

表1 土壤物理性质测试结果

Tab. 1 Test results of physical characteristics of soil

编号	含水率 /%	土壤容重 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙度 /%	土壤空气容量 /%	地表温度 / $^{\circ}\text{C}$	坑底温度 / $^{\circ}\text{C}$
1	20.05	1.68	38.5	4.8	27.2	22.6
2	16.11	1.75	36.2	8.0	29	24.5
3	10.82	1.62	40.4	22.8	30	24.8
4	11.52	1.53	43.5	25.8	26	22.4
5	7.72	1.41	47.4	36.5	26	22.3
6	7.9	1.59	41.3	28.7	33.2	23.2

由表1可见,土壤含水率和土壤孔隙度是土壤的主要物理参数,其容重及空气容量与二者关系紧密。环境温度对土壤理化性质也有影响。所以把土壤含水率、孔隙度和环境温度作为主要的物理因素。另外,由表2可见, K^+ 、 Na^+ 作为一类影响因素, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 作为一类影响因素, CO_3^{2-} 在研究区域的土壤样品中含量最少,所以不作为主要影响因素考虑。由此确定影响埋地金属管道腐蚀的土壤关键因素。进而可对试验区域的土壤设定室内腐蚀模拟试验的因素水平,进行试验方案的设计。

1.2 室内腐蚀模拟试验

1.2.1 因素水平设置

据1.1,以土壤含水率、孔隙度、环境温度、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、pH等9种关键因素为试验因素,分别设定3个水平,如表3所示。以30d为周期,进行9因素3水平($L_{27}3^9$)的室内腐蚀模拟埋片正交试验。

1.2.2 试验材料

试验材料1为20号钢冷却水化学处理标准腐蚀试片。试片尺寸为50.0 mm×25.6 mm×2.0 mm,

表2 土壤阴阳离子及pH测试结果

Tab. 2 Test results of anions, cations and pH value of soil

编号	K^+ /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Na^+ /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Ca^{2+} /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Mg^{2+} /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	CO_3^{2-} /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	HCO_3^- /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	SO_4^{2-} /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Cl^- /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	pH
1	9.097	0	79.62	37.36	0	137.29	0	23.5	8.13
2	2312.349	2690.73	0	983.84	74.935	413.98	194.05	36.2	9.16
3	137.866	715.93	96.93	283.31	13.176	248.2	65.18	37.2	9.25
4	8.919	56.13	38.41	55.49	0	137.48	24.74	32	8.1
5	20.099	0	98.82	63.99	0	129.17	27.83	29	8.1
6	65.287	5.34	8.12	37.13	0	64.98	27.76	25.7	7.52
7	1280.166	1923.25	960.92	1055.34	53.665	640.25	109.87	39.8	9.24
8	680.618	1241.95	110.69	728.95	31.822	310.08	430.69	23.65	9.46

表 3 因素水平设置表

Tab. 3 Arrangement on factor level

因素	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	含水率/%	孔隙度/%	环境温度/°C	pH	HCO ₃ ⁻ /(μg·g ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ /(μg·g ⁻¹)	Cl ⁻ /(μg·g ⁻¹)	Na ⁺ /(μg·g ⁻¹)	Ca ²⁺ /(μg·g ⁻¹)
水平 1	5	40	15	7	100	50	20	10	50
水平 2	15	45	20	8	250	200	30	100	500
水平 3	20	50	25	9	500	500	40	1 000	1 000

表面积为 2 862.4 mm²。在试片一端距棱边 5 mm 的中央处开有 φ3 mm 小孔,并打有钢号。表面经机械加工达到一致的表面平整度。

试验材料 2 为土壤样品,是通过标准土样制备而成的,根据基本参数模拟的,实现试验需要的各项物理化学指标。

1.2.3 试验步骤

(1) 制备标准土样。

(2) 制备试验用特定参数的土壤。根据水平因素表换算所需各种相应化学物质的用量,模拟离子含量,同时模拟土壤孔隙度、含水率、pH 等,得到具有特定参数的土壤。

(3) 进行试验前的埋片处理,然后对应钢号贴上相应的标签。

(4) 称量标准质量的土样,将土样装至试验桶的 1/3 处,然后将 3 个试片竖直插入土中,呈中心对称布置。利用环境气候室控制所需环境温度。

(5) 待满试验周期(30 d)后,将试片从土样中取出处理,并收集腐蚀物。

(6) 计算埋片的平均腐蚀速率^[9]。

$$\bar{v} = \frac{\Delta\bar{w}}{s \times t} \quad (1)$$

式中: \bar{v} 为平均腐蚀速率,g/(m²·h); $\Delta\bar{w}$ 为腐蚀试片的平均腐蚀失重,g;s 为试片的表面积,m²;t 为腐蚀时间,h。

(7) 利用全自动扫描型 X 射线荧光光谱仪对腐蚀物成分进行分析。

1.3 现场验证试验

为了更好地验证室内试验的结果,在现场集输管道沿线埋设试片,待试验期结束后取出,观察埋片并测试腐蚀物成分。

2 结果与讨论

2.1 试验结果

2.1.1 室内试验结果

根据表 3 设置室内模拟埋片正交试验(L₂₇3⁹)的因素水平,如表 4 所示,进行了 27 组室内模拟埋

片试验,得到的试验结果见表 4。

图 1 是选取的第 19 组试验埋片腐蚀前后的形

表 4 L₂₇(3⁹)因素水平及试验结果

Tab. 4 Experimental results and factor level of L₂₇(3⁹)

编号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	腐蚀速率 (g·h ⁻¹ · m ⁻²)
	含水率	孔隙度	温度	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.004 8
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0.029 1
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	0.041 4
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	0.047 3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	0.097 7
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	0.006 3
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	0.079 7
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	0.006 0
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	0.072 3
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	0.051 5
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	0.077 1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	0.120 3
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	0.111 3
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	0.132 6
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	0.042 0
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	0.056 9
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	0.032 4
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	0.068 8
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	0.042 2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	0.033 7
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	0.155 4
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	0.045 2
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	0.083 0
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	0.027 1
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	0.037 1
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	0.017 6
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	0.029 4
K1	0.385	0.556	0.389	0.445	0.476	0.497	0.586	0.230	0.435	
K2	0.693	0.593	0.484	0.541	0.509	0.564	0.488	0.514	0.550	
K3	0.471	0.400	0.675	0.562	0.563	0.487	0.474	0.804	0.563	
k1	0.043	0.062	0.043	0.049	0.053	0.055	0.065	0.026	0.048	
k2	0.077	0.066	0.054	0.060	0.057	0.063	0.054	0.057	0.061	
k3	0.052	0.044	0.075	0.062	0.063	0.054	0.053	0.089	0.063	
R	0.034	0.021	0.032	0.013	0.010	0.009	0.012	0.064	0.014	

貌,埋片材质均为 20 号钢。由图 1 可见,处理过的完好新试片表面光洁,腐蚀试验结束后,试片表面附着厚度不均的腐蚀产物,腐蚀比较严重,清洗表面腐蚀产物后,可以看到腐蚀已深入试片内部,且局部分布有腐蚀坑。



(a) 腐蚀前



(b) 腐蚀后

图 1 腐蚀前后试片的表面形貌

Fig. 1 Appearance of test pieces before (a) and after (b) corrosion test

2.1.2 现场验证试验结果

现场验证试验期结束后取出埋片见图 2,埋片清扫表面浮土后,可以看出埋片表面附着的黄色腐蚀产物,消除腐蚀产物后发现表面不均匀地分布着点蚀坑,收集腐蚀产物后,对其进行成分分析。



(a) 清扫浮土后

(b) 清除腐蚀产物后

图 2 现场取出试片的表面形貌

Fig. 2 Appearance of test piece after surface soil wiping off (a) and appearance of test piece after corrosion product wiping off (b)

2.2 讨论

2.2.1 各因素对腐蚀速率的影响分析

由表 4 可见,随着含水率、孔隙度的增大,腐蚀速率会增大并出现峰值,之后随着含水率和孔隙率的增大,腐蚀速率降低。说明随着含水率的增加,土壤中游离的离子含量增多,土壤的电导率也增加,使得土壤的腐蚀性增强,但随着含水率的进一步增加,土壤密实度增强,其中的空气含量减少,空气含量的多少影响金属的氧化反应,所以腐蚀速率反而减弱。同理,随着孔隙度的增加,土壤中空气含量随之增加,促进土壤中金属的腐蚀,然而随着孔隙度的进一步增大,土壤中游离的阴阳离子数量减少,即一定程度上抑制了金属氧化还原反应,使得腐蚀速率降低。

随着温度和 pH 的增加,腐蚀速率增加,表明常温以下的较低温度,埋地金属腐蚀速率很低,也就是说温度条件是腐蚀反应的催化剂,温度越高,土壤中的菌群越活跃,加速腐蚀。本研究中的试验区域属于盐碱性土壤,试验中针对盐碱性土壤的 pH 设置了 3 个水平,结果显示,随着碱性增强,对金属的腐蚀作用增强。

随着 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 含量的增大,腐蚀速率增大,表明盐碱含量增加促进腐蚀作用。随着 SO_4^{2-} 含量的增大,腐蚀速率先降低,之后基本保持不变,表明其含量的增加从某种程度来看可以抑制腐蚀作用。而随着 Cl^- 含量的增加,腐蚀速率出现先增大后减小的趋势。

2.2.2 各影响因素的重要度序

根据试验结果,对各因素影响下的腐蚀速率进行了方差分析^[10],如表 5 所示。

由表 5 的方差分析结果可以看出:

(1)所选 9 种土壤腐蚀因素重要度序是: Na^+

表 5 腐蚀速率方差分析

Tab. 5 Analysis of variance in corrosion rate

方差来源	离差平方和	自由度	F 比	临界值	显著性
A	0.005 626	2	3.902 0	4.46	*
B	0.002 316	2	1.606 2	4.46	
C	0.004 730	2	3.280 7	4.46	*
D	0.000 861	2	0.597 0	4.46	
E	0.000 427	2	0.296 5	4.46	
F	0.000 395	2	0.274 1	4.46	
G	0.000 824	2	0.571 7	4.46	
H	0.018 308	2	12.697 2	4.46	**
I	0.001 098	2	0.761 4	4.46	
误差	0.005 768	8			

含量(H)>含水率(A)>温度(C)>Ca²⁺含量(B)>孔隙度(I)>pH(D)>SO₄²⁻含量(G)>HCO₃⁻含量(E)>Cl⁻含量(F)。

(2) 其中含水率、温度、孔隙度等物理因素对腐蚀速率的作用效果要高于一般的离子。

(3) 试验中为控制土壤的酸碱度水平,采用醋酸和氢氧化钠作为 pH 调节剂,然而试验中未考虑醋酸根离子对腐蚀速率的影响,故试验结果中 Na⁺含量的变化伴随着醋酸根离子的变化,表现出对腐蚀速率影响大,这种情况的发生更大的可能是来自于两者的共同作用。同时,在离子水平设置时 Na⁺和 Ca²⁺相邻水平变化幅度较大,它们对腐蚀速率的影响也间接反映了总含盐量对腐蚀速率的影响。

2.2.3 室内试验腐蚀产物成分光谱分析

利用全自动扫描型 X 射线荧光光谱仪对室内模拟试验收集的腐蚀产物进行成分分析,以含水率的变化为考虑因素制备腐蚀产物样品 1 组,以全因素变化为考虑因素制备腐蚀产物样品 1 组,得到各元素氧化物的质量百分含量结果如表 6,7 所示。

表 6 以含水率为主因素的 3 水平腐蚀产物混合样主要元素质量百分含量

Tab. 6 Percent contents of main elements of 3 level corrosive mixture considering moisture content as main factor %

主要元素	Mg	Al	Si	Fe	K	Ca
百分含量	1.015	10.483	34.095	42.843	1.468	7.383

表 7 考虑全部因素的腐蚀产物混合样主要元素质量百分含量

Tab. 7 Percent contents of main elements of corrosive mixture considering all factors %

主要元素	Mg	Al	Si	Fe	K	Ca
百分含量	1.097	11.715	38.004	38.824	1.629	6.050

由表 6,7 两组腐蚀产物的主要元素及其质量百分含量可以看出,腐蚀产物中占有比例较大的是铁、硅、铝、钙等。与试验土的主要成分(如表 8)基本一致,但含量不同。腐蚀产物中铁元素含量高,而土中硅含量高,但是土壤的组成会影响金属腐蚀产物的组成。另外,腐蚀产物主要是以腐蚀过程氧化反应的主要产物——金属氧化物形式存在,如 Fe₂O₃。以含水率为主因素变化的试验腐蚀物主要元素铁等金属成分的含量高于综合因素的结果,这也反映了含水率对埋管腐蚀作用的影响很大,进一步印证了正交试验的结果,即含水率是主要影响因素。

表 8 试验土样主要元素质量百分含量

Tab. 8 Percent contents of main elements of

	soil specimen						%
主要元素	Na	Mg	Al	Si	Fe	K	Ca
百分含量	1.546	1.419	16.958	63.203	5.222	3.496	6.125

2.2.4 现场验证试验腐蚀物成分分析

对于同期现场埋片验证试验的腐蚀产物进行光谱分析,结果如表 9 所示。

表 9 现场埋片试验腐蚀产物主要元素质量百分含量

Tab. 9 Percent contents of main elements of corrosion

	product in site verification experiment					%
主要元素	Mg	Al	Si	Fe	Ca	
百分含量	1.062	18.757	15.931	54.586	3.586	

由表 9 可见,现场试验结果腐蚀产物的主要成分与室内试验结果大体相同,主要差别是含量的不同,究其原因是不同重要度的影响因素变化会改变埋地金属管道的腐蚀程度,也就是说,土壤环境的变化是一种动态变化过程,且它的动态变化对埋地金属管道腐蚀的影响也是动态的,所以长期监测局部土壤环境的变化可以为更好地研究埋地管道防腐蚀措施提供有利依据。

3 结论与建议

为揭示埋地金属管道腐蚀机理,针对大庆油田龙虎泡作业区域土壤进行室内腐蚀模拟试验、现场验证试验及腐蚀物成分分析等研究,通过试验结果的分析得出以下结论,并提出改善土壤腐蚀性的几点建议:

(1) 区域土壤组分及含量的变化较大,且是动态的变化过程,这使得区域土壤腐蚀性表现出很大的差异性。

(2) 由室内腐蚀模拟正交试验可以得出土壤环境影响因素的重要度序为:Na⁺>含水率>温度>Ca²⁺>孔隙度>pH>SO₄²⁻>HCO₃⁻>Cl⁻。

(3) 土壤中 Na⁺含量从 0 变化到 2 200 μg/g,它的显著变化影响着腐蚀速率的变化,所以由方差分析结果看出,Na⁺成为第一影响因素。但是因为 NaOH 在 pH 调节过程中的应用,使得 Na⁺的含量变化超出原有的因素设置水平,造成 Na⁺的影响与实际工程情况有出入。

(4) 因各影响因素的重要度不同,如含水率、温

(下转第 1020 页)

电极表面处于活化状态;第 5、6 行电极表面的局部区域形成了密实的腐蚀产物层;第 9、10 行电极表面形成了较大范围的致密腐蚀产物层。

3 结论

在海水与大气交换的水线区域,碳钢存在较为严重的腐蚀。通过阵列电极技术捕获的电偶电流分布图发现:在海水浸泡前 15 d,碳钢主要发生局部区域的非均匀腐蚀;在海水浸泡 15 d 后,发生的是处于大气区域与处于海水浸没区域的碳钢之间构成的宏观非均匀腐蚀。线性极化技术测试结果表明,垂直海水一大气界面的碳钢分别在水线区域和近水线海水区域存在腐蚀峰。通过腐蚀电位、电化学阻抗及腐蚀形貌的比较可以初步判断,处于水线区域、远水线海水区、近水线海水区、近水线大气区和远水线大气区,碳钢的腐蚀机理不同。

致谢:感谢国家重点基础研究发展计划(973 计划,2014CB643300)和国家材料环境腐蚀平台给予的资金支持。

参考文献:

[1] 侯保荣,郭公玉,马士德,等. 海洋环境中海-气与海-泥交换界面区腐蚀与防护研究[J]. 海洋科学,1993(2):31-34.

(上接第 1013 页)

度、孔隙度、pH 等对腐蚀速率影响比重较大,所以通过降低含水率、增大孔隙度使得土壤干燥,减少游离的阴阳离子可以抑制腐蚀。即对高含水区域可以通过挖排水沟引水,更换部分腐蚀严重区域的土壤,降低含水,改善腐蚀环境。调节局部土壤的酸碱度也能在一定程度上改善其腐蚀性。

(5) 对腐蚀产物的分析结果表明,金属氧化物 Fe_2O_3 是油田埋地金属管道的主要腐蚀产物,且含水率是影响该区域埋地金属管道腐蚀的主要影响因素。

参考文献:

[1] 王冬雪. 龙虎泡、新肇油田土壤腐蚀性研究[J]. 化学工程与装备,2011(9):247-248.
[2] 黄莉萍. 外围油田埋地金属管道腐蚀穿孔原因及控制建议[J]. 当代化工,2012,41(2):149-151,172.
[3] 聂向晖,杜翠薇,李晓刚. 温度对 Q235 钢在大港模拟溶液中腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护,2008,29(4):171-174.

[2] 陈亚林,张伟,王伟,等. WBE 技术研究水线区 Q235 碳钢腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报,2014,34(5):451-458.
[3] YONG J T,STUART B,BRIAN K. Mapping non-uniform corrosion using the wire beam electrode method. III. Water-line corrosion[J]. Corrosion Science,2001,43:1931-1937.
[4] GUBNER R J. Biofilms and accelerated low-water corrosion in carbon steel piling in tidal waters[D]. Portsmouth;University of Portsmouth,1998.
[5] EVANS U R. Report on corrosion research work at cambridge university interrupted by the outbreak of war[J]. J Iron Steel Inst,1940,141:219-234.
[6] EVANS U R. Translated by Hua B D. The corrosion and oxidation of metals[M]. Beijing:Mechanical Industry Press,1976:70-75.
[7] TOMASHOV N D. The theory of corrosion and protection of metals[M]. New York:MacMillan,1966.
[8] JEFFREY R,MELCHERS R E. Corrosion of vertical mild steel strips in seawater[J]. Corros Sci,2009,51(10):2291-2297.
[9] 张雪. 利用阵列电极研究水线腐蚀机理[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.
[10] 陈亚林. 阵列电极技术研究水线区金属腐蚀及涂层剥离过程[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.

[4] ZHANG L,LI X G,DU C W. Effect of environmental factors on electrochemical behavior of X70 pipeline steel in simulated solution[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2009,16(6):52-57.
[5] 高磊,吕维玲,曹江利. 20 钢在北京不同类型土壤模拟溶液中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护,2012,33(11):972-975.
[6] FRASER K,RUSSELL G,ROBERT G W, et al. Effect of transitions in the water table and soil moisture content on the cathodic protection of buried pipelines[J]. Journal of Pressure Vessel Technology,2011,133(1):17031-17036.
[7] 黄亮亮,孟惠民,黄晓林,等. X60 管线钢在盐碱性土壤中的腐蚀行为与机理[J]. 油气储运,2013,32(3):257-262.
[8] 赵茜,徐士祺. 土壤中各类离子对 X80 埋地管道钢腐蚀行为研究[J]. 辽宁化工,2013,42(8):916-918.
[9] 何树全. 20 号钢在大庆典型土壤中的腐蚀规律及预测[D]. 大庆:大庆石油学院,2007.
[10] 吴翊,李永乐,胡庆军. 应用数理统计[M]. 北京:国防科技大学出版社,2012:241-252.