

长输管道站场区域阴极保护馈电试验结果分析

马贵利¹ 刘海峰² 王 浩³ 陈虹锦³ 彭 磊¹ 汤雨霖³
魏群坤³ 袁 豹³ 何炆忆⁴ 陈彬源⁵

1. 中国石油青海油田公司管道处, 青海 格尔木 816000;
2. 中国石油西南油气田公司, 四川 成都 610051;
3. 中国石油西南油气田公司蜀南气矿, 四川 泸州 646000;
4. 四川华油集团有限责任公司, 四川 成都 610023;
5. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041

摘 要:对已建站场进行区域阴极保护系统改造时,若仅参照类似工程项目方案和经验进行,则可能造成站内部分埋地管道或设备不能得到充分的阴极保护,导致管道上的管地电位分布不均,同时还可能对站场周边埋地钢质管道形成杂散电流干扰,影响站场周边管道阴极保护系统的正常运行。通过在某站场开展现场馈电试验时不断变换区域阴极保护系统通电点、馈电点位置,分析了区域阴极保护系统输出电压、输出电流、通电点位置等因素对区域阴极保护效果的影响;同时对区域阴极保护采用牺牲阳极方式的有效性进行了分析,发现牺牲阳极使用数年后,接地电阻会增大,失去阴极保护效果。根据馈电试验分析结果,提出了站场区域阴极保护系统整改过程中应采取合理布置通电点和馈电点的技术措施,同时认为在长输管道站场区域阴极保护系统中应谨慎使用牺牲阳极。研究结果可为今后长输管道站场区域阴极保护系统的改造提供借鉴。

关键词:馈电试验;区域阴极保护;保护电位;牺牲阳极;分布式深井阳极

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.06.014

Analysis on the feeding test results of regional cathodic protection in long-distance pipeline station

MA Guili¹, LIU Haifeng², WANG Hao³, CHEN Hongjin³, PENG lei¹, TANG Yulin³,
WEI Qunkun³, YUAN Bao³, HE Wenyi⁴, CHEN Binyuan⁵

1. Pipeline Department of PetroChina Qinghai Oilfield Company, Golmud, Qinghai, 816000, China;
2. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan, 610051, China;
3. Shunan Gas Mine of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Luzhou, Sichuan, 646000, China;
4. Sichuan Huayou Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610023, China;
5. CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China

Abstract: If the reconstruction of regional cathodic protection for existing stations is only based on previous project design schemes and experience of similar projects, some facilities may not have sufficient cathodic protection and the potential distribution may be uneven. It may also cause stray current

收稿日期:2022-08-17

基金项目:中国石油集团工程股份有限公司科研课题“天然气有机硫深度脱除工艺技术研究”(2018ZYGC-02-01)

作者简介:马贵利(1988-),男,山东聊城人,工程师,学士,主要从事油气管输运行和管道完整性管理,油气生产场站管理工作。E-mail:450659285@qq.com

interference for buried steel pipeline around the station, affecting the normal operation of neighbouring cathodic protection systems. This paper carried out field feeding test in one of the stations. By changing the location of power energization point and feeding point, this paper analyzed the effect of output voltage, output current, location of energization point on the regional cathodic protection system. This paper also analyzed the effectiveness of sacrificial anode for regional cathodic protection, and found that after several years in service, the ground resistance increased and the sacrificial anode could not provide effective cathodic protection. Based on the feeding test results, it is proposed that power energization points and feeding points should be optimally arranged during the rectification of the cathodic protection system in the pipeline station region. It is also recognized that sacrificial anodes should be used cautiously in the cathodic protection system of the long distance pipeline station region. The research results can provide a reference for the reconstruction of cathodic protection system in the long distance pipeline station region in the future.

Keywords: Feeding test; Regional cathodic protection; Protective potential; Sacrificial anode; Distributed deep well anode

0 前言

西南地区某长输管道站场在建设时采用镁合金牺牲阳极阴极保护系统对站内埋地管道和设备进行区域阴极保护。该区域阴极保护系统运行几年后站内所有埋地管道的保护电位均出现问题,达不到 GB/T 21448—2017《埋地钢质管道阴极保护技术规范》中阴极保护管地电位应位于 $-0.85 \sim -1.2$ V 之间(相对于硫酸铜参比电极消除 IR 降后^[1])的要求,影响站场完整性管理,同时也影响站内埋地管道设备的安全运行,依据 GB/T 35508—2017《场站内区域性阴极保护》(以下简称 GB/T 35508—2017)和 GB/T 21447—2018《钢质管道外腐蚀控制规范》(以下简称 GB/T 21447—2018)的规定,需对站场区域阴极保护系统进行整改,整改前需对站内埋地管道设备进行阴极保护馈电试验,根据试验结果确定整改方案和技术措施。

1 站场区域阴极保护系统

1.1 系统介绍

在站场建设时,采用镁合金牺牲阳极对站内埋地管道和设备进行区域阴极保护。站内设置镁合金牺牲阳极 12 组,每组埋设镁合金牺牲阳极 3~4 支,每支 14 kg,共埋设牺牲阳极 39 支,每组牺牲阳极安装处设置防爆接线箱一个,牺牲阳极通过接线箱内接线端与站场埋地管道联通,对埋地管道进行阴极保护,整个牺牲阳极区域阴极保护系统于 2009 年投入使用。站内防爆接线箱见图 1。

站内埋地钢质管道采用 3PE 防腐层防腐,规格主要有 D1 016、D323、D273、D168、D114、D108、D89 等,材质主要为 L485 和 L245。站内埋地管道面积约 510 m²;站内接地系统为镀锌扁钢,镀锌扁钢面积约 45 m²。

进出站场管道 3 根:1 根进站管道 DN1 000,设计压

力 10 MPa;1 根出站管道 DN1 000,设计压力 10 MPa;1 根出站管道 DN300,设计压力 4 MPa。3 根管道上分别安装对应规格的绝缘接头各 1 个。



图 1 站内防爆接线箱照片

Fig. 1 Explosion proof junction box in the station

1.2 系统测试

依据 GB/T 35508—2017 和 GB/T 21447—2018 的要求,按照 GB/T 21246—2020《埋地钢质管道阴极保护参数测量方法》(以下简称 GB/T 21246—2020)中规定的测试方法对站场原有区域阴极保护系统牺牲阳极的开路电位、通电电位、接地电阻进行了测试^[2-5],详细测试结果见表 1。

在完成站场原有区域阴极保护系统牺牲阳极的相关参数测试后,按照 GB/T 21246—2020 中规定的测试方法对进出站场管道上的绝缘接头也进行了性能测试,测试数据见表 2。

表 1 站场原有区域阴极保护系统参数测试表

Tab. 1 Parameter test of existing cathodic protection system

测试位置	牺牲阳极开路电位 /V	通电电位 /V	牺牲阳极接地电阻 / Ω
MA1	-1.466	-0.810	41.5
MA2	-1.437	-0.798	28.9
MA3	-1.400	-0.868	38.0
MA5	-1.478	-0.769	47.5
MA6	-1.519	-0.800	34.0
MA7	-1.428	-0.824	18.5
MA8	-1.431	-0.795	50.0
MA9	-1.409	-0.810	36.5
MA10	-1.473	-0.828	35.5
MA11	-1.436	-0.815	72.1
MA12	-1.488	-0.812	32.4

注:MA1~MA12 分别代表第 1~12 组牺牲阳极测试位置。

表 2 线路管道绝缘接头性能测试表

Tab. 2 Performance test of insulation joint of pipelines

测试位置	保护侧管地电位 /V	非保护侧管地电位 /V
绝缘接头 1	-1.034	-0.671
绝缘接头 2	-1.203	-0.663
绝缘接头 3	-1.372	-0.644

绝缘接头性能测试完成后,为确定站内埋地管道的自然电位,将站内所有牺牲阳极与埋地管道设备断开,待埋地管道完全去极化后,在站内各测试点对埋地管道的自然腐蚀电位和土壤电阻率进行了测试,测试点位置见图 2,测试结果见表 3。由表 3 可知,站内埋地管道的自然腐蚀电位在 $-0.564 \sim -0.666$ V,且管道所处环境土壤电阻率较低,均小于 $40 \Omega \cdot \text{m}$,依据电化学腐蚀理论,碳钢在此条件下受到的腐蚀程度较为严重^[6-7]。

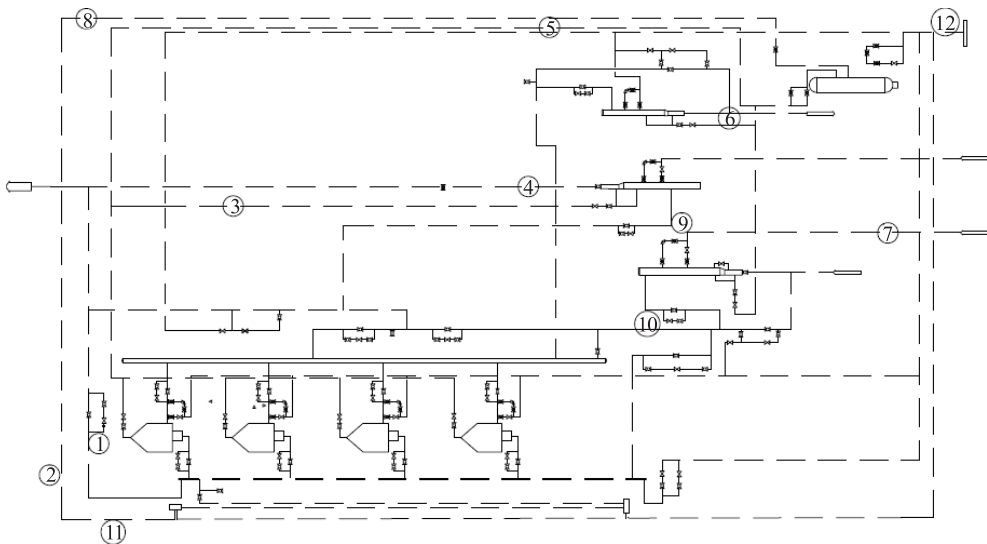


图 2 站场测试点分布图

Fig. 2 Distribution diagram of station test points

注:①~⑫为测试点编号(下同)。

表 3 站场埋地管道自然电位测试表

Tab. 3 Natural potential of buried piping in station

测试点	自然腐蚀电位 /V	土壤电阻率 / $\Omega \cdot \text{m}$
①	-0.619	31.2
②	-0.564	32.0
③	-0.646	28.5
④	-0.650	33.6
⑤	-0.666	35.2
⑥	-0.645	35.0
⑦	-0.655	31.6
⑧	-0.637	25.5
⑨	-0.618	32.2
⑩	-0.621	34.5
⑪	-0.564	30.5
⑫	-0.585	29.5

1.3 站场原有阴极保护系统测试结果分析

根据表 1 可以看出,站内安装的镁合金牺牲阳极在运行几年后,由于接地电阻太高,站内镁合金牺牲阳极最小接地电阻为 18.5Ω ,最大接地电阻为 72.1Ω ,大部分牺牲阳极接地电阻都大于 35Ω ,因此牺牲阳极即使开路电位仍然维持在 -1.45 V 左右,但由于受接地电阻太高的影响,其输出电流很小,不能满足站内埋地管道、设备达到最小阴极保护断电电位的需求,因此现场测试发现站内埋地管道、设备基本处于自然电位状态,没有得到有效的阴极保护^[8]。

根据表 2 可以看出进出站场输气管道上安装的绝缘接头性能良好,因为绝缘接头保护侧和非保护侧现场测试的管地电位差值较大,站内埋地管道基本是自然电位,但站外保护侧管地电位基本都与线路管道阴极保护

系统的通电电位一致,因此说明进出站场输气管道上安装的绝缘接头性能良好^[9-11]。

2 现场馈电试验

2.1 试验目的

根据站场现场测试结果可知,站场区域阴极保护系统已经失效,无法对站内埋地管道设备提供阴极保护。为对站内埋地管道及设备实施有效的阴极保护,应采用强制电流阴极保护系统,为保证站场强制电流区域阴极保护系统的有效性,防止因电位分布不均出现部分管道得到有效保护但部分管道得不到保护的情况,同时为减少站场强制电流区域阴极保护系统对线路输气管道的杂散电流干扰,需进行现场馈电试验^[12]。通过馈电试验确定站场强制电流区域阴极保护系统通电点最优位置、数量,确定站场区域阴极保护系统正常运行时的电流需求量、输出电压、保护电位等^[13]。

2.2 试验设备

为保证试验效果,在进行现场馈电试验时,需准备直流稳压电源作为阴极保护电源设备,利用站场围墙边已有线路阴极保护系统的深井阳极作为阳极地床,同时

还可利用站内牺牲阳极安装处与管道连接的电缆作为通电点电缆或测试电缆进行馈电试验。设备主要有硫酸铜参比电极、万用表、滑动电阻、同步通断仪、土壤电阻率测试仪等。

2.3 试验方案

馈电试验以直流稳压电源为阴极保护电源设备,以站场围墙边深井阳极为阳极地床,以站内设置的1号、4号、10号牺牲阳极安装点中的一处或多处为通电点和馈电点进行试验和数据记录,详细通电点及馈电点设置方案见表4。站内通电点及馈电点在站内分布位置见图3。

表4 通电点及馈电点设置方案表

Tab. 4 Power energization point and feeding point setting scheme

方案	通电点设置位置	馈电点设置位置
1	MA1	—
2	MA4	—
3	MA10	—
4	MA10	MA4
5	MA10	MA1
6	MA10	MA1 + MA4

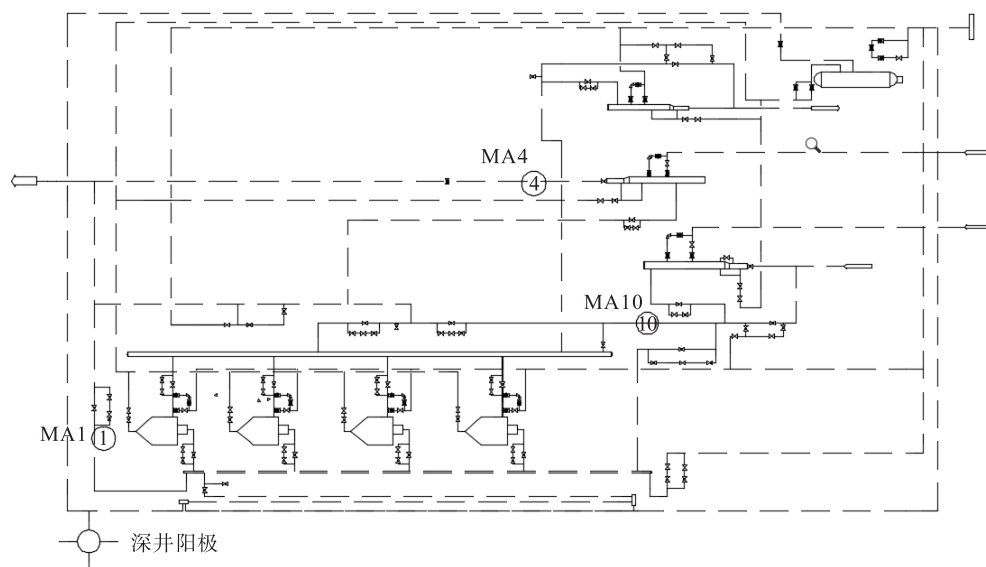


图3 站内通电点及馈电点分布位置图

Fig. 3 Distribution position of power energization point and feeding point

为确定站内区域阴极保护系统是否对站外埋地管道造成直流干扰,在馈电试验前关闭站外管道线路阴极保护系统,待管道完全去极化后,在围墙测试桩处测试记录站外管道自然电位,在试验进行过程中,再次测试记录站外管道自然电位,对2个数据进行比较分析,确定站场区域阴极保护系统对站外管道的直流干扰程度^[14-16]。

2.4 试验过程

试验前断开站内所有牺牲阳极,将围墙边深井阳极

的阳极电缆与直流稳压电源设备的阳极端相连接,同时将直流稳压电源设备的阴极端与通电点处管道进行连接,设置有馈电点时,从直流稳压电源设备的阴极端接1根电缆与馈电点设置位置处的管道相连接。连接好后,将直流稳压电源设备开机,调整直流稳压电源设备输出电流大小,待站内各处理地管道充分极化后在各测试点测量埋地管道保护电位和断电电位,并记录直流稳压电源输出电流、输出电压,测试点位置见图2^[17]。

2.5 试验数据

在进行表 4 各方案的现场馈电试验中,当直流稳压电源输出电压达到 7.0 V 左右时,各测试点通电电位略超过 -0.85 V,但断电电位达不到 -0.85 V;直流稳压电源输出电压达到 8.0 V 左右时,各测试点通电电位均超过 -0.95 V,断电电位基本达到 -0.85 V。不同通电点或馈电点设置方案的输出电流存在一定差异,设置多个通电点和馈电点时所需的阴极保护电流最小。现场试验时,阴极保护电源设备输出电压为 7.0 V 和 9.0 V 时,各测试点都记录了测试数据,各测试点在阴极保护电源设备输出电压为 7.0 V 时通电电位和输出电流数据见表 5~6。

阴极保护电源设备输出电压为 9.0 V 时通电电位和输出电流数据见表 7~8。

表 5 输出电压为 7.0 V 时各测试点通电电位测试记录表

Tab.5 On potential test of each test point when output voltage is 7.0 V

测试点	通电电位 /V					
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
①	-0.963	-0.972	-0.973	-0.985	-0.988	-0.992
②	-1.004	-1.008	-1.008	-1.010	-1.011	-1.015
③	-1.040	-1.042	-1.044	-1.065	-1.071	-1.085
④	-0.976	-0.982	-0.983	-0.990	-0.993	-0.995
⑤	-0.964	-0.974	-0.976	-0.980	-0.982	-0.995
⑥	-0.982	-0.983	-0.986	-0.992	-1.012	-1.015
⑦	-1.035	-1.037	-1.037	-1.040	-1.041	-1.045
⑧	-1.212	-1.215	-1.218	-1.222	-1.223	-1.225
⑨	-0.905	-0.908	-0.906	-0.912	-0.914	-0.919
⑩	-0.901	-0.902	-0.906	-0.907	-0.910	-0.911
⑪	-0.928	-0.929	-0.931	-0.934	-0.938	-0.942
⑫	-1.147	-1.149	-1.152	-1.155	-1.158	-1.165

表 6 输出电压为 7.0 V 时各方案输出电流表

Tab.6 Output current of each scheme when output voltage is 7.0 V

方案	输出电流 /A
方案 1	0.91
方案 2	1.00
方案 3	0.96
方案 4	0.88
方案 5	0.85
方案 6	0.82

表 7 输出电压为 9.0 V 时各测试点通电电位测试记录表

Tab.7 On potential test of each test point when output voltage is 9.0 V

测试点	通电电位 /V					
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
①	-1.100	-1.121	-1.114	-1.117	-1.120	-1.122
②	-1.166	-1.199	-1.201	-1.204	-1.206	-1.212
③	-1.169	-1.187	-1.195	-1.197	-1.201	-1.205
④	-1.092	-1.114	-1.114	-1.115	-1.117	-1.118
⑤	-1.112	-1.135	-1.138	-1.139	-1.142	-1.145
⑥	-1.112	-1.122	-1.125	-1.128	-1.129	-1.132
⑦	-1.184	-1.208	-1.208	-1.209	-1.212	-1.218
⑧	-1.457	-1.460	-1.483	-1.485	-1.489	-1.492
⑨	-1.020	-1.040	-1.039	-1.115	-1.117	-1.118
⑩	-1.014	-1.034	-1.040	-1.045	-1.048	-1.051
⑪	-1.107	-1.128	-1.132	-1.135	-1.147	-1.148
⑫	-1.333	-1.353	-1.367	-1.375	-1.377	-1.382

表 8 输出电压为 9.0 V 时各方案输出电流表

Tab.8 Output current of each scheme when output voltage is 9.0 V

方案	输出电流 /A
方案 1	1.90
方案 2	2.05
方案 3	1.95
方案 4	1.85
方案 5	1.82
方案 6	1.80

试验过程中,为核实站内区域阴极保护系统是否对站外埋地管道造成直流干扰,在进出站管道上的绝缘接头外侧进行了管地电位测试,即在站内强制电流区域阴极保护系统开启前,在进出站管道上的绝缘接头外侧进行管地电位测试并进行记录,记录后开启站内强制电流区域阴极保护系统,再在进出站管道上的绝缘接头外侧相同位置进行管地电位测试并记录,对同一位置 2 次测试数据进行比较,分析站内区域阴极保护系统对站外埋地管道的直流干扰情况^[18],现场测试位置见图 4,测试数据见表 9。

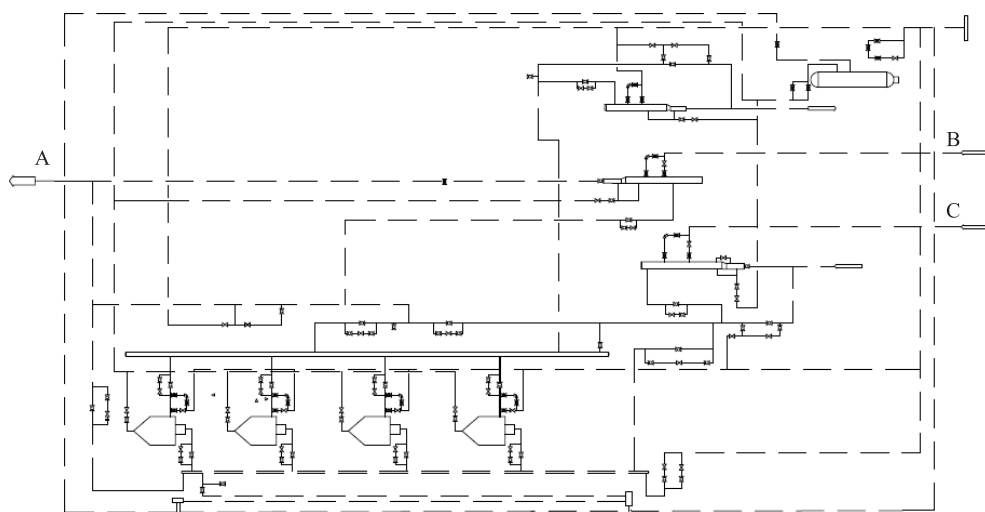


图 4 干扰分析测试位置图

Fig. 4 Test position of interference analysis

注: A、B、C 为测试点编号。

表 9 区域阴极保护系统干扰电位测试记录表

Tab. 9 Interference potential test record of regional cathodic protection system

测试时间	通电电位 /V					
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
A 点开启前	-0.921	-0.921	-0.921	-0.921	-0.921	-0.921
A 点开启后	-0.845	-0.846	-0.848	-0.865	-0.868	-0.880
B 点开启前	-1.102	-1.102	-1.102	-1.102	-1.102	-1.102
B 点开启后	-1.099	-1.099	-1.100	-1.100	-1.101	-1.101
C 点开启前	-1.081	-1.081	-1.081	-1.081	-1.081	-1.081
C 点开启后	-0.791	-0.791	-0.795	-0.805	-0.826	-0.832

注: 开启前表示站内区域阴极保护系统开机前; 开启后表示站内区域阴极保护系统开机后。

2. 6 试验结果

根据上述试验数据可知, 站场强制电流区域阴极保护系统采用深井阳极地床形式完全可以保证站场内各处理地管道设备得到有效的阴极保护, 同时站内通电点和馈电点的不同设置位置会影响阴极保护电流的流向和分布, 对站场区域阴极保护的效果影响较大, 对站外管道的干扰程度也不一样, 从试验数据可以看出采用在图 3 所示的 MA10 设置通电点, 同时在 MA1 和 MA4 各设置馈电点一处, 站场区域阴极保护系统的电流分布较均匀, 站内各处理地管道均可得到有效的阴极保护, 同时对站外管道干扰也最小^[19-20]。

3 结论

1) 由于长输管道站场内接地系统会泄漏区域阴极保护电流, 同时牺牲阳极阴极保护系统输出电流有限,

且牺牲阳极使用数年后, 接地电阻会增大, 因此采用牺牲阳极对长输管道站场内埋地管道进行区域阴极保护时应谨慎。

2) 对长输管道站场区域阴极保护系统进行改造时, 采用馈电试验的方式可以较好地掌握在不同通电点、馈电点设置情况下站内埋地管道的管地电位分布情况。通过对测试数据进行分析, 可合理设置通电点、馈电点, 并且配合分布式深井阳极地床的设置以避免站场大面积开挖, 节约投资, 减小施工难度, 同时大大减少施工过程中可能存在的安全隐患。

3) 对长输管道站场区域阴极保护系统进行改造时, 为保证阴极保护电流的均匀分布, 应采用通电点和馈电点结合的方式给埋地管道提供阴极保护电流, 且通电点和馈电点应尽量均匀布置, 减少管道屏蔽, 保证阴极保护效果。

参考文献:

- [1] 全国石油天然气标准化技术委员会. 埋地钢质管道阴极保护技术规范: GB/T 21448—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
SAC/TC 355. Specification of cathodic protection for underground steel pipelines: GB/T 21448—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [2] 全国石油天然气标准化技术委员会. 埋地钢质管道阴极保护参数测量方法: GB/T 21246—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
SAC/TC 355. Measurement method for cathodic protection parameters of buried steel pipelines: GB/T 21246—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [3] 全国防腐蚀标准化技术委员会. 场站内区域性阴极保护:

- GB/T 35508—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- SAC/TC 381. Regional cathodic protection within station; GB/T 35508—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [4] 全国石油天然气标准化技术委员会. 油气输送管道完整性管理规范: GB 32167—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- SAC/TC 355. Oil and gas pipeline integrity management specification; GB 32167—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [5] 全国石油天然气标准化技术委员会. 钢质管道外腐蚀控制规范: GB/T 21447—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- SAC/TC 355. Specifications for steel pipeline external corrosion control; GB/T 21447—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [6] 马伟平, 张国忠, 梁昌华, 等. 储罐底板阴极保护电位分布规律探讨[J]. 天然气与石油, 2004, 22(4): 18-21.
- MA Weiping, ZHANG Guozhong, LIANG Changhua, et al. Discussion on potential distribution law of cathodic protection on tank bottom plate [J]. Natural Gas and Oil, 2004, 22 (4): 18-21.
- [7] 崔 淦, 李自力, 卫 续, 等. 基于边界元法的站场区域阴极保护设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(6): 161-166.
- CUI Gan, LI Zili, WEI Xu, et al. Cathodic protection design of station area based on boundary element method [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38 (6): 161-166.
- [8] 王卫金, 李凤全, 郭岫岩, 等. 丛式井区域性阴极保护试验与研究[J]. 天然气与石油, 2004, 22(1): 31-33.
- WANG WeiJing, LI Fengquan, GUO Xiuyan, et al. Test and study on regional cathodic protection in cluster well [J]. Nature Gas and Oil, 2004, 22 (1): 31-33.
- [9] 钟富荣. 阴极保护系统的漏电故障及预防措施[J]. 天然气工业, 1984, 4(2): 63-69.
- ZHONG Furong. Electric leakage trouble of cathode protection system and its provision [J]. Natural Gas Industry, 1984, 4 (2): 63-69.
- [10] 刘海禄, 张国虎, 马含悦, 等. 天然气处理厂阴极保护投运问题分析[J]. 天然气与石油, 2004, 32(3): 53-55.
- LIU Hailu, ZHANG Guohu, MA Hanyue, et al. Analysis on problems occurring during cathodic protection system commissioning in natural gas treatment plant [J]. Natural Gas and Oil, 2004, 32 (3): 53-55.
- [11] 陈 波, 李 果, 林 涛, 等. 提高站场区域阴极保护效果实践与认知[J]. 天然气与石油, 2018, 36(3): 87-91.
- CHEN Bo, LI Guo, LIN Tao, et al. Practice and cognition of improving regional cathodic protection effect in oil & gas station [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (3): 87-91.
- [12] 吴 玲, 兰 翔, 刘 军. 长输管道阴极保护电位的自动检测技术研究[J]. 天然气与石油, 2005, 23(5): 17-19.
- WU Ling, LAN Xiang, LIU Jun. Research on automatic testing technology for cathodic protection potential in long distance pipeline [J]. Natural Gas and Oil, 2005, 23 (5): 17-19.
- [13] 董龙伟, 廖柯熹. 相邻储罐底板阴极保护电位的分布[J]. 材料保护, 2016, 49(3): 64-67.
- DONG Longwei, LIAO Kexi. Cathodic protection potential distribution of adjacent tank bottom [J]. Materials Protection, 2016, 49 (3): 64-67.
- [14] 夏定健. 外加电流阴极保护辅助阳极[J]. 全面腐蚀控制, 2005, 19(2): 38-41.
- XIA Dingjian. Impressed current cathodic protection anodes [J]. Total Corrosion Control, 2005, 19 (2): 38-41.
- [15] 和宏伟, 门 程, 白冬军, 等. 智能阴极保护采集监控系统的应用与发展[J]. 天然气与石油, 2014, 32(5): 80-83.
- HE Hongwei, MEN Cheng, BAI Dongjun, et al. Application and development of intelligent cathodic protection remote acquisition monitoring system [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32 (5): 80-83.
- [16] 董龙伟, 董 斌. 储罐底板在阴极保护中阳极类型的选择[J]. 天然气与石油, 2017, 35(2): 96-100.
- DONG Longwei, DONG Bin. Selection of anode type for cathodic protection of tank bottom [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (2): 96-100.
- [17] 李海坤, 谢 涛, 王 颖, 等. 区域阴极保护实践与分析[J]. 天然气与石油, 2013, 31(2): 73-75.
- LI Haikun, XIE Tao, WANG Ying, et al. Practice and analysis on regional cathodic protection [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31 (2): 73-75.
- [18] 付晓芬. 大型航煤储罐罐底板阴极保护及 MMO 柔性阳极的应用[J]. 机场建设, 2011(3): 33-35.
- FU Xiaofen. Application of cathodic protection and MMO flexible anode of large aviation coal storage tank bottom [J]. Airport Construction, 2011 (3): 33-35.
- [19] 胡学文, 吴丽蓉, 许崇武, 等. 外加电流阴极保护用辅助阳极的研究现状及发展趋势[J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(12): 546-549.
- HU Xuewen, WU Lirong, XU Chongwu, et al. Situation and development tendency of research on anodes for applied-current cathodic protection [J]. Corrosion & Protection, 2000, 21 (12): 546-549.
- [20] 范亚卓, 鞠 鹤, 蔡天晓, 等. 柔性阳极在大型储油罐底上的应用[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2010, 27(4): 44-46.
- FAN Yazhuo, JU He, CAI Tianxiao, et al. Application of anodeflex in large oil tank bottom [J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2010, 27 (4): 44-46.