

西南山地油气管道交流干扰 的检测及防护

胡绍磊¹ 王啟和¹ 何嶢艳¹ 刘念² 万运华² 陈彬源³ 于帅⁴ 陆学杰⁴

1. 中国石油天然气股份有限公司西南管道昆明输油气分公司, 云南 昆明 650500;
2. 中国石油西南油气田公司, 四川 成都 610051;
3. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
4. 中国石油天然气股份有限公司西南管道兰成渝输油分公司, 四川 成都 610041

摘要:随着中国西部大开发战略的实施,中国西南地区的油气管道建设取得了突飞猛进的发展,但与这些油气管道并行敷设的高压输电线路也越来越多,两者之间产生了难以避免的相互干扰和影响。为保证两者的安全运行,通过对西南地区两段典型的山地天然气管道所遭受的交流杂散干扰电流进行检测和分析,并根据管道所处地区的地形地貌特点,结合现场实际情况,制定了交流干扰防护措施,最后通过对交流干扰防护措施实施后的有效性进行测试分析。比较分析得出:西南山地油气管道遭受交流干扰时,可采用排流井的形式进行交流杂散干扰电流的排流;该种排流方案占地面积小,现场施工简单,排流效果显著,特别适合于环境条件类似的西南山地油气管道交流干扰杂散电流的排流。研究结果为类似条件的山地油气管道交流干扰治理提供了借鉴措施,具有一定参考意义。

关键词:杂散电流;山地油气管道;排流井;缓解线

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.02.014

Test and Protection of AC Interference in Southwest Mountainous Oil and Gas Pipeline

Hu Shaolei¹, Wang Qihe¹, He Zhengyan¹, Liu Nian², Wan Yunhua², Chen Binyuan³, Yu Shuai⁴, Lu Xuejie⁴

1. PetroChina Southwest Pipeline Kunming Oil & Gas Transportation Company, Kunming, Yunnan, 650500, China;
2. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan, 610051, China;
3. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
4. The Lanzhou-Chengdu-Yulin Oil Transportation Company of PetroChina Southwest Pipeline Branch, Chengdu, Sichuan, 610041, China

Abstract: With the implementation of the western development strategy in China, the construction of oil and gas pipelines in southwest China has made rapid progress, but there are more and more high-voltage transmission lines laid in parallel with these oil and gas pipelines, which have unavoidable interference and

收稿日期:2019-11-12

基金项目:中国石油天然气集团公司“高压直流电区域管道风险防控技术研究”项目(KY 2016-06)

作者简介:胡绍磊(1990-),男,云南曲靖人,工程师,学士,主要从事油气长输管道完整性管理工作。E-mail:769586465@qq.com

influence on each other. In order to ensure the safe operation of the pipeline and high-voltage transmission lines, the detection and analysis of the AC stray current interference suffered by two typical mountain pipelines in southwest China have been introduced in this paper, and the protection for AC interference is formulated according to the special landform characteristics of the pipeline and the actual situation of the site. Finally, through the test and analysis of the protection after the actual implementation, it is concluded that when the ground oil and gas pipeline in southwest mountain areas suffers the AC interference, the form of stray current drainage well can be used to carry out the AC stray current interference. This scheme is suitable for the drainage of AC interference current in the southwest mountainous pipeline oil & gas due to its small land occupation, and it is a way of simple site construction and remarkable drainage effect. The result provides reference for the disposal of AC interference in mountainous oil & gas pipeline of similar conditions.

Keywords: Stray current; Mountainous oil & gas pipeline; Stray current drainage well; Drainage line

0 前言

随着国民经济的不断发展,中国对能源的需求越来越大,特别是对石油、天然气的需求更是与日俱增。这几年中国西南地区的油气管道里程剧烈增长,这些管道大部分敷设在山区地带,所处地形以山地为主,被称为山地管道^[1]。本文研究的山地油气管道途经地区的地形地貌为山涧沟谷,地势起伏大,管道穿越地区大部分地段都是山高谷深、河流纵横、地质灾害频发,部分区域地质活动强烈、地震发育密集^[2]。与此同时,管道周边高压输电线路的建设规模也在日益加大,由于地方城镇规划要求和路径择优选择原则,山地油气管道经常与高压输电线路长距离并行或多次交叉,形成长距离的共用走廊带^[3]。国内外大量案例表明,与埋地金属管道并行的高压输电线路会通过电磁感应、电阻耦合等方式在埋地金属管道上感应出电压和电流,可能会对管道造成严重的交流干扰^[4],从而对管道产生不可忽视的危害,如引起交流腐蚀,导致管道穿孔泄漏,加速防腐层的剥离,影响阴极保护系统的正常运行,造成保护电位不满足保护要求等问题,同时还会对工作人员产生电击危害,严重威胁工作人员的人身安全,因此成为山地油气管道管理的重要关注点^[5]。

通过对西南地区某段山地天然气管道交流干扰情况的检测和评估,发现该段管道存在较严重的交流干扰,通过对不同缓解措施在经济性、适用性方面的分析和比较,最终研究得出适合于缓解山地油气管道交流干扰的措施,该措施的成功应用^[6]为类似条件的山地油气管道交流干扰治理提供了借鉴措施,具有一定参考意义。

1 现场检测

西南地区的山地油气管道部分位于云贵高原,这里大部分为红土地区,土壤电阻率差异性较大^[7],部分地区土壤电阻率很高,而部分地区土壤电阻率又较低。现场对西南地区两段山地天然气管道进行现场测试,A段

管道的桩号为K 0607~K 0612,管道长度约6 km,管径为D 1 016 mm,管道钢级为X 80,设计压力10 MPa,运行压力6.8 MPa,管道壁厚有12.8、15.3和18.4 mm三种规格,管道外防腐层采用三层PE,管道阴极保护方式为强制电流阴极保护^[8]。B段管道的桩号为K 0839~K 0872,管道长度约为34 km,管径为D 1 016 mm,管道钢级为X 80,设计压力10 MPa,运行压力6.8 MPa,壁厚有12.8、15.3、18.4 mm三种规格,管道外防腐层采用三层PE,管道阴极保护方式为强制电流阴极保护。

以上两段管道多处与高压输电线路长距离并行,局部地段距离高压输电线的铁塔较近,为保障管道的安全运行,特针对这两段管道开展交流干扰专项检测。

1.1 干扰源分布

通过现场调查,A、B两段管道的干扰分布情况见表1。由表1可见,A、B两段管道多次与高压交流输电线路交叉并存在有不同程度的并行,其中与A段管道的K 0609~K 0612段管道并行或交叉的高压交流输电线路电压等级较高,为500 kV/220 kV,同时还是两回高压交流输电线路与管道并行和交叉,且管道与高压交流输电线路间距较近,最近为20 m左右,并行长度也很长,约5 km,该段管道受到交流干扰的风险较高。

1.2 干扰数据测试

现场在A段管道上的测试桩安装位置处进行了管道交流干扰电压测试和管道附近土壤电阻率测试,并根据GB/T 50698-2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》^[9]的规定进行交流干扰电流密度计算,A段管道交流干扰电压测试结果及交流干扰电流密度详细计算结果见表2。

由表2可知,A段管道的K 0607到K 0612号桩之间的线路管道所受交流干扰较大,交流电流密度为5.36~238.42 A/m²之间,其中K 0607、K 608和K 610测试桩处管道交流电流密度均超过100 A/m²,不满足GB/T 50698-2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》要求,需要安装排流缓解措施^[10]。

现场也在 B 段管道上的测试桩安装位置处进行了管道交流干扰电压测试和管道附近土壤电阻率测试,并根据 GB/T 50698-2011《埋地钢质管道交流干扰防护

技术标准》^[9]的规定进行交流干扰电流密度计算,B 段管道交流干扰电压测量结果及交流干扰电流密度详细计算结果见表 3。

表 1 干扰源分布统计表

Tab. 1 Distribution statistics of interference sources

管道名称	桩号位置	输电线电压等级 /kV	干扰情况描述
A 段管道	K 0607 ~ K 0609	220	交叉 3 次,并行长度约 1 km,间距多为 20 ~ 500 m
A 段管道	K 0609 ~ K 0612	500 /220	交叉 1 次,并行长度 4 km,间距多为 80 ~ 1 000 m
B 段管道	K 0839 ~ K 0844	500	交叉 3 次
B 段管道	K 0844 ~ K 0851	35、15	交叉 1 次,与 35 kV 输电线并行长度 10 km,并行间距多为 20 ~ 300 m,与 15 kV 输电线并行长度 8 km,并行间距多为 400 ~ 1 000 m
B 段管道	K 0851 ~ K 0855	110	交叉 3 次,并行长度 3 km,并行间距多为 100 ~ 500 m
B 段管道	K 0855 ~ K 0873	110、220	交叉 2 次

表 2 A 段管道交流干扰电压测量结果及交流干扰电流密度计算表

Tab. 2 AC voltage measurement statistics and AC density calculation of A pipeline

管道名称	桩号位置	管道交流干扰电压 /V	管道埋深 /m	土壤电阻率 /($\Omega \cdot m$)	交流电流密度 /($A \cdot m^{-2}$)
A 段管道	K 0607	12.67	2.0	28.52	100.11
A 段管道	K 0608	13.49	1.1	22.18	137.06
A 段管道	K 0609	11.89	1.5	499.50	5.36
A 段管道	K 0610	16.05	1.4	15.17	238.42
A 段管道	K 0611	12.92	2.7	121.57	23.95
A 段管道	K 0612	11.30	1.3	34.63	73.53

表 3 B 段管道交流干扰电压测量结果及交流干扰电流密度计算表

Tab. 3 AC voltage measurement statistics and AC density calculation of B pipeline

管道名称	桩号位置	管道交流干扰电压 /V	管道埋深 /m	土壤电阻率 /($\Omega \cdot m$)	交流电流密度 /($A \cdot m^{-2}$)
B 段管道	K 0839	5.38	1.30	78.65	15.42
B 段管道	K 0841	6.15	1.40	169.60	8.17
B 段管道	K 0844	5.72	1.02	21.17	60.89
B 段管道	K 0845	5.95	1.00	22.80	58.81
B 段管道	K 0851	11.67	1.20	20.28	129.68
B 段管道	K 0853	14.00	1.20	301.50	10.46
B 段管道	K 0855	14.43	1.70	477.40	6.81
B 段管道	K 0856	14.25	1.10	189.90	14.70
B 段管道	K 0857	13.80	1.43	220.70	12.25
B 段管道	K 0858	14.32	1.50	97.50	33.10
B 段管道	K 0859	13.93	1.00	25.13	124.92
B 段管道	K 0862	13.23	1.00	217.30	13.72
B 段管道	K 0864	12.43	1.45	79.73	35.13
B 段管道	K 0865	11.75	1.20	359.60	7.36
B 段管道	K 0866	10.90	1.25	133.50	18.40
B 段管道	K 0867	9.58	1.00	654.00	3.30
B 段管道	K 0870	8.60	1.00	481.20	4.03
B 段管道	K 0871	7.30	1.00	98.07	16.77
B 段管道	K 0872	6.66	1.00	55.91	26.84
B 段管道	K 0873	6.23	2.00	290.50	4.83

由表3可知,B段管道的K 0839~K 0873号桩之间的线路管道所受交流杂散电流干扰比A段管道所受干扰小,管道上的交流电流密度为 $1.41 \sim 129.68 \text{ A/m}^2$ 之间,其中K 0851和K 859测试桩处管道上的交流干扰电流密度均超过 100 A/m^2 ,不满足GB/T 50698-2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》的安全要求,需要安装排流缓解设施。

2 检测结果分析

1)由表2~3可以看出,A段管道K 0607到K 0612和B段管道K 0839到K 0872,均受到高压交流输电线路的交流干扰影响,其中A段管道最高干扰电压 16.05 V ,最大干扰电流密度 238.42 A/m^2 ,B段管道最高干扰电压 14.32 V ,最大干扰电流密度 129.68 A/m^2 。根据测试数据可知,高压交流输电线的输电电压等级及其与管道的并行间距对管道交流干扰影响十分显著^[11]。B段管道虽与高压交流输电线路并行距离较长,但是该高压交流输电线的电压等级比与A段管道并行的高压交流输电线的电压等级低,因此其所受交流干扰程度也较A段管道受干扰程度低^[12]。

2)A段管道大部分地区的土壤电阻率小于 $25 \Omega \cdot \text{m}$,持续干扰交流电压大于 4 V ,交流电流密度为 $5.36 \sim 238.42 \text{ A/m}^2$ 之间,其中K 0607、K 608和K 610测试桩交流电流密度均超过 100 A/m^2 ,不满足GB/T 50698-2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》的安全要求,需要安装排流缓解设施^[13]。

3)B段管道受高压交流输电线的干扰范围广,从K 0839号桩~K 0873号桩,长度超过 10 km ,管道沿线大部分地段的土壤电阻率较高,很多地段的土壤电阻率超过 $100 \Omega \cdot \text{m}$,根据交流干扰电流密度计算结果可以看出B段管道所受交流干扰程度比A段管道受干扰程度小,其中仅有K 0851和K 0859测试桩交流电流密度超过 100 A/m^2 ,不满足GB/T 50698-2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》的安全要求,需要安装排流缓解设施^[14]。

3 交流干扰防护措施

管道遭受严重的交流杂散电流干扰后,亟需解决的问题就是交流杂散干扰电流的排流和缓解。交流杂散干扰电流排流缓解技术的相关研究已有近30年的历史^[15]。目前国内外常用的交流缓解措施主要包括增大管道与干扰源之间距离、集中接地、安装排流井及缓解线等^[16]。其中,交流排流装置和缓解线相结合的方法由于具有施工方便、排流效果显著的特点,得到了国内外同行的一致肯定,获得了大量推广应用^[17],也是目前使

用最广泛的交流杂散干扰电流排流方法。该种措施是在管道和高压电线之间,与管道平行敷设缓解线,缓解线通过交流排流装置与管道相连接。排流井也是采用缓解线和交流排流装置相结合的方式,这种方式特别适合于西南山地管道,因为西南山地油气管道沿线坡高、山陡、林密水深,沟壑纵横,沿管道平行敷设缓解线存在很多困难,不易实施,采用将缓解线竖直安装在排流井中,缓解线另一端通过交流排流装置与管道连接的方式,简单方便,在受地形限制的山地管道上可大量推广应用^[18]。

3.1 A段管道排流设施安装

A段管道长度约 5 km ,管道上的最高干扰电压 16.05 V ,该段管道设置排流设施2处,分别位于K 0607和K 0610号桩处。两处排流地点均位于半山坡位置,附近没有连续地段适合敷设缓解线,只有根据现场情况安装排流井。其中K 0607附近土壤电阻率约 $28.5 \Omega \cdot \text{m}$,K 0610附近土壤电阻率约 $15.2 \Omega \cdot \text{m}$,根据GB/T 21448-2017《埋地钢质管道阴极保护技术规范》的计算方法进行计算后确定在K 0607附近安装排流井3口,每口深度 20.5 m ,在K 0610附近安装排流井2口,每口深度 20.5 m ,井口位置根据附近地形确定。每口井内安装排流缓解线 20 m 。现场施工完成后,K 0607附近3口井并联后接地电阻约 1.8Ω ,K 0610附近2口井并联后接地电阻约 1.6Ω 。最后将排流井通过排流设施与管道进行连接,安装完成后测试管道上交流干扰电压,详细测试结果见表4。

表4 A段管道安装排流设施后的交流干扰电压测试数据统计表

Tab.4 Test data statistics of AC interference voltage of A pipeline after installation of drainage facilities

序号	管道名称	桩号位置	管道上的交流干扰电压/V
1	A段管道	K 0607	1.8
2	A段管道	K 0608	2.0
3	A段管道	K 0609	2.1
4	A段管道	K 0610	2.0
5	A段管道	K 0611	2.0
6	A段管道	K 0612	2.5

根据表4所示测试情况,安装排流井后,管道上交流干扰电压均降至GB/T 50698-2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》规定的 4 V 以下^[19],最高交流干扰电压约 2.5 V ,符合标准要求,证明A段管道所选用的排流方式的排流效果较好。

3.2 B段管道排流设施安装

B段管道长度约 34 km ,管道上的最高干扰电压

14.32 V, 该段管道中地理条件适合水平敷设缓解线的地段, 就采取安装缓解线加排流设施的方案进行排流, 地理条件不合适的位置还是采取 A 段管道所采取的排流井的排流方案进行排流。

B 段管道共设置排流设施 10 处, 其中有 2 处采用安装排流缓解线的方式进行排流, 分别位于 K 0851 到 K 0859 号桩附近的管道上, 剩余 8 处全部采用排流井的排流方案进行排流。B 段管道的沿线土壤电阻率均较高, 因此根据 GB/T 21448-2017《埋地钢质管道阴极保护技术规范》的计算方法进行计算后, 为方便现场施工管理, 确定采用排流井方式的 8 处排流点, 每处均设置排流井 4 口, 每口深度 20.5 m, 间距大于 10 m, 井口位置根据排流点附近地形确定, 最好采用“一”字型布置。每口井内安装排流缓解线 20 m。现场施工完成后, 要求每口排流井的接地电阻低于 4Ω。10 处排流设施安装完成后, 对 B 段管道上的交流干扰电压进行了测试, 测试结果见表 5。

表 5 B 段管道安装排流设施后的交流干扰电压测试数据统计表

Tab. 5 Test data statistics of AC interference voltage of B pipeline after installation of drainage facilities

序号	管道名称	桩号位置	管道上的交流干扰电压/V	排流方式
1	B 段管道	K 0841	2.6	排流井
2	B 段管道	K 0851	2.1	缓解线
3	B 段管道	K 0853	3.2	排流井
4	B 段管道	K 0855	3.4	排流井
5	B 段管道	K 0858	2.9	排流井
6	B 段管道	K 0859	3.0	缓解线
7	B 段管道	K 0862	2.5	排流井
8	B 段管道	K 0865	2.6	排流井
9	B 段管道	K 0867	1.9	排流井
10	B 段管道	K 0872	2.0	排流井

根据表 5 所示测试情况, 安装排流设施后, B 段管道上交流干扰电压均降至 GB/T 50698-2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》规定的 4 V 以下^[20], 最高交流干扰电压约 3.4 V, 从排流效果上看, 排流井和缓解线差别不大, 都能将管道上的交流干扰电压降至标准规定的范围内。

4 结论与建议

1) 通过对西南山地油气管道所受交流杂散电流干扰情况的测试分析可以看出, 与管道并行的高压交流输电线路输电电压等级越高, 并行距离越长, 并行间距越

小, 管道受到的杂散电流干扰越严重。因此在今后的管道建设中一定要保证管道与高压交流输电线的间距, 尽量不要与高压交流输电线路长距离平行敷设。

2) 西南地区的山地油气管道由于受地形条件限制, 不易采取缓解线加排流装置的方案排流时, 可采取排流井的方式排流。两条管道的现场实际应用情况证明该种排流方案占地面积小, 现场施工简单可靠, 安装方便, 排流效果好。当一口排流井不能满足排流效果时, 可设置多口排流井, 多口排流井之间通过并联进行排流工作, 可大大提高排流效果, 保障管道的安全运行。

参考文献:

- [1] 冉箭声, 宁海春, 鲁胜伟, 等. 山区管道应用阴极保护技术常见问题及解决措施[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2012, 29(4): 31-33.
Ran Jiansheng, Ning Haichun, Lu Shengwei, et al. Technical Problems in Cathodic Protection of Mountainous Pipelines and Solutions [J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2012, 29(4): 31-33.
- [2] 王新华, 陈振华, 何仁洋. 埋地钢质管道交流干扰测试与评价[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(1): 66-70.
Wang Xinhua, Chen Zhenhua, He Renyang. Testing and Assessment of AC Interference on Buried Steel Pipelines [J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(1): 66-70.
- [3] 李军龙, 徐星, 巩毅超, 等. 长输油气站场阴极保护[J]. 天然气与石油, 2016, 34(3): 79-82.
Li Junlong, Xu Xing, Gong Yichao, et al. Cathodic Protection for Long Distance Oil & Gas Station [J]. Natural Gas and Oil, 2016, 34(3): 79-82.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 郑凤, 王雨生, 孔德生, 等. 基于 WebGIS 的川西输气管道阴极保护在线检测[J]. 天然气与石油, 2012, 30(3): 75-77.
Zheng Feng, Wang Yusheng, Kong Desheng, et al. Online Monitoring on Cathodic Protection System for Western Sichuan

- Gas Pipeline Based on WebGIS [J]. *Natural Gas and Oil*, 2012, 30 (3): 75-77.
- [7] 陈彬源,张胜利,唐强.国内外石油公司在外防腐保温和阴极保护方面的差异[J].*天然气与石油*,2011,29(1):51-53.
Chen Binyuan, Zhang Shengli, Tang Qiang. Differences in External Corrosion Protection, Heat Preservation and Cathodic Protection Practices of Domestic and Foreign Oil Companies [J]. *Natural Gas and Oil*, 2011, 29 (1): 51-53.
- [8] 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,2018.
SAC/TC 381. Regional Cathodic Protection Within Station: GB/T 35508-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [9] 曾刚勇,韩兴平.输气管道阴极保护电绝缘装置失效检测与预防——以中国石油西南油气田公司金山输气站绝缘装置为例[J].*天然气工业*,2012,32(2):103-105.
Zeng Gangyong, Han Xingping. Inspection and Countermeasures for the Failures of Electrical Insulation Device by Cathodic Protection: A Case Study in the Jinshan Gas Transmission Station Operated by the PetroChina Southwest Company [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32 (2): 103-105.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 应斌.高压直流输电系统接地极对长输管道安全运行的影响[J].*油气田地面工程*,33(7):23-24.
Ying Bin. The Influence of HVDC Grounding Electrode on the Safe Operation of Long-distance Pipeline [J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 33 (7): 23-24.
- [13] 毛建,曹国飞,汤建平,等.高压直流接地极对油气输送管道的危害辨识[J].*天然气与石油*,2019,37(1):68-74.
Mao Jian, Cao Guofei, Tang Jianping, et al. Hazard Identification of HVDC Grounding Pole to Oil & Gas Pipeline [J]. *Natural Gas and Oil*, 2019, 37 (1): 68-74.
- [14] 施纪卫,冯琦,杨英,等.天然气长输管道与高压送电线路设施靠近段的安全措施分析[J].*天然气与石油*,2006,24(4):43-46.
Shi Jiwei, Feng Qi, Yang Ying, et al. Analysis on Safe Measures of Long-distance Gas Pipeline Close to High Voltage Power Line [J]. *Natural Gas and Oil*, 2006, 24 (4): 43-46.
- [15] 孙振侨,谢军.天然气长输管道的防腐与防护措施[J].*能源与节能*,2013(8):36-38.
Sun Zhenqiao, Xie Jun. Corrosion Prevention and Protective Measures for Long-distance Natural Gas Transporting Pipeline [J]. *Energy and Energy Conservation*, 2013 (8): 36-38.
- [16] 刘国.固态去耦合器在管道交流干扰防护中的应用[J].*油气储运*,2016,35(4):449-456.
Liu Guo. Application of Solid State-Decoupler in AC Interference Mitigation of Pipelines [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2016, 35 (4): 449-456.
- [17] 茅斌辉,王胜炎,胡士信,等.强电线路下的阴极保护管道交流干扰防护措施[J].*腐蚀与防护*,2015,36(3):281-285.
Mao Binhui, Wang Shengyan, Hu Shixin, et al. Protection of Alternating Current Interference to Cathodically Protected Pipelines Under Power Transmission Lines [J]. *Corrosion & Protection*, 2015, 36 (3): 281-285.
- [18] 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.
- [19] 汤丁,何鑫,许捷,等.埋地输气管道的直流杂散电流干扰分析与排流措施[J].*天然气勘探与开发*,2018,41(4):94-99.
Tang Ding, He Xin, Xu Jie, et al. Interference of DC Stray Currents to Buried Gas Pipelines and Corresponding Drainage Measures [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2018, 41 (4): 94-99.
- [20] 尚泰玉,许进,尚思贤.高压线路对地下输油管道中杂散电流影响规律[J].*腐蚀科学与防护技术*,2007,19(5):371-372.
Shang Qinyu, Xu Jing, Shang Sixian. Influence of Stray Current of Oil Pipeline Under High-Voltage Transmitting Line [J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2007, 19 (5): 371-372.