

三维地形下并行管道阴保干扰规律 数值模拟研究

李荐乐

(中国石化销售股份有限公司 华东分公司 嘉兴输油处, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: **目的** 研究三维地形下的并行管道干扰规律, 提出降低并行管道干扰的合理措施。**方法** 使用 BEASY 软件进行数值模拟, 通过设置不同的涂层破损率、管道直径、土壤电阻率、输出电流等探究各参数对三维地形下并行管道干扰的影响规律。**结果** 并行管道间存在干扰, 相较于单根管道, 在辅助阳极附近的管道阴极保护电位变小, 其他位置处管道保护电位略有上升。随管道并行间距增加, 干扰减弱。土壤电阻率越大, 阳极输出电流越大, 辅助阳极距管道距离越近, 管道直径越小, 并行管道间干扰越剧烈。**结论** 对于独立设置阴极保护的并行管道, 推荐管道并行间距大于 80 m; 对于联合阴极保护的并行管道, 推荐管道并行间距小于 7 m。

关键词: 外加电流; 阴极保护; 三维地形; 并行管道; 干扰规律

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.06.010

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)06-0058-08

Numerical Simulation of Parallel Pipeline Interference Law in Three-dimensional Terrain

LI Jian-le

(Jiaxing Office of East China branch of Sinopec Sales Co., Ltd, Jiaxing 314000, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the interference rules of parallel pipelines in three-dimensional terrain and provide reasonable measures to reduce parallel pipeline interference. BEASY software was used for numerical simulation in this paper, by setting different coating damage rates, pipe diameters, soil resistivity, output currents and other parameters, the effects of different parameters on the interference of parallel pipelines in 3D terrain were explored. Mutual interference indeed existed between the parallel pipelines. Compared with single pipelines, the protection potential of the pipeline near the auxiliary anode became negative, and the potential of the pipeline in the far distance became positive. As the parallel spacing of the pipes increased, the interference decreased. The larger the earth resistivity, the larger the anode output current, the closer the auxiliary anode to the pipeline, the smaller the pipe diameter, the more severe the interference between the parallel pipelines. For parallel pipelines under independent cathodic protection, the parallel spacing of the pipelines is recommended to be greater than 80m; for parallel pipelines under combined cathodic protection, the parallel spacing of the pipelines is recommended to be less than 7 m.

KEY WORDS: impressed current; cathodic protection; three-dimensional terrain; parallel pipeline; interference law

收稿日期: 2020-02-15; 修订日期: 2020-02-28

Received: 2020-02-15; Revised: 2020-02-28

作者简介: 李荐乐(1987—), 男, 工程师, 主要研究方向为成品油管道安全管理。

Biography: LI Jian-le (1987—), Male, Engineer, Research focus: product oil pipeline safety management.

阴极保护与管道的防腐涂层一起构成了管道的双层保护体系,是埋地管道主要防护措施,在管道防腐方面发挥着重要作用^[1-5]。阴极保护技术的原理^[6-8]是通过外加电流方法或者牺牲阳极方法向管道表面提供阴极电流,使管道产生阴极极化,减小管道表面腐蚀。两种方法的原理相同,都是向管道表面提供阴极电流,只是保护电流的来源有所不同:牺牲阳极法的保护电流来源于活泼金属,例如镁、铝、锌等;而外加电流法的保护电流来自于恒电位仪的输出电流。油气管道通常采用外加电流阴极保护为主,牺牲阳极阴极保护为辅的保护方式。

当管道存在近距离并行或交叉时,管线的独立阴极保护系统之间会出现严重的干扰问题,造成管道腐蚀风险的增加^[9-13]。此外,干扰容易导致恒电位仪运行故障,甚至出现不能正常投入使用的状况。目前社会高速发展,各种电气化铁路、交直流高压输电线等设施的大力建设,导致管道受到外界杂散电流干扰普遍存在。这类干扰问题往往范围小,变化不明显,难以发现。当并行管道遇上外界交直流干扰情况时,各种干扰问题结合,加重了干扰导致的腐蚀现象。在地形限制下的“公共走廊”内,油气管道之间近距离交叉或并行敷设,容易引起阴极保护系统间强烈的相互干扰。

当管道位于山区敷设时,并行管道之间的干扰问题将更加复杂^[14-15]。主要体现在:管道沿线土壤、岩石分布情况复杂,地形起伏较大,且管道需要穿/跨越的位置较多,由此引起的阴保电流分布的连续性、均匀性与一般平原地区管道存在显著差异;此外,山区管道起伏、迂回,单根管道采用阴极保护时,在三维空间内不同管段之间存在相互干扰,数值模拟计算中,管道的空间位置不能忽略^[16]。构建与山区管道实际情况更相符的三维并行管道模型,成为解决山区并行管道阴极保护问题的重要基础。长输管道位于山区地形下,获取阴极保护数据将会非常困难。因此,采

用数值模拟方法,模拟获得管道沿线电位分布,对于管道日常运行与维护具有重要意义^[17]。

国外在开展并行管道阴极保护技术研究时,主要借助的是数值模拟技术,该技术能够为这种特殊工况下的阴极保护设计提供指导。数值方法已在过去的二十年里证明是分析腐蚀问题的强力工具^[18-20]。应用于腐蚀研究的数值方法包括了有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)以及边界元法(BEM)。自20世纪80年代初以来,BEM已被用于模拟阴极保护系统。与FDM和FEM相比,BEM只需要边界的网格划分。因此,BEM相较于FEM需要较少的方程组和较小的矩阵尺寸,并且可以解决有限域和半无限域问题。

文中采用基于边界元法建立的电化学腐蚀仿真软件 BEASY 进行三维地形下并行管道的数值模拟,通过比较并行管道与单根管道之间的阴极保护电位差,探究三维地形下并行管道的干扰规律。其次研究了涂层破损率、土壤电阻率、阳极输出电流、辅助阳极与管道间距离、管道直径等参数对并行管道间干扰的影响规律。最后探究了独立设置阴极保护、联合阴极保护的并行管道阴极保护参数随管道并行间距的演化规律,给出了管道并行的合理间距。

1 数值模拟

使用电化学腐蚀仿真软件 BEASY 进行三维地形下并行管道模型的建立,如图 1 所示。模型基础参数设置如下:管道全长为 10 km,管径为 0.6 m,各位置埋深均为 2 m,防腐涂层破损率为 1%,辅助阳极位于管道中心位置处,长 20 m,直径为 0.1 m,埋深为 3 m,与管道之间距离为 50 m,外加电流为 5000 mA,土壤电阻率为 20 $\Omega \cdot \text{m}$ 。此外定义辅助阳极附近的管段为管道中心区域,远离辅助阳极的管段被称作管道远处区域。

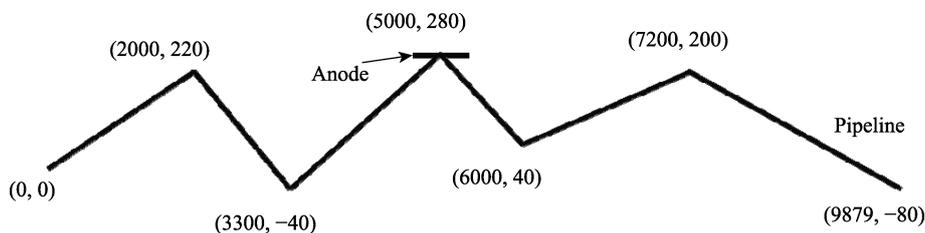


图 1 三维地形下管道模型

Fig.1 Schematic diagram of pipeline model in 3D terrain

独立设置阴极保护的并行管道模型是通过将上面三维地形中的管道平移一段距离,这个距离即为管道并行间距,辅助阳极在管道两端对称布置,参数设置同上。左侧管道命名为 pipe1,左侧辅助阳极命名为 anode1,右侧管道命名为 pipe2,右侧辅助阳极命名为 anode2。独立设置阴极保护的并行管道模型如图 2 所示。联合阴极保护的并行管道模型如图 3 所示,

此时只有一个辅助阳极,即 anode1,两根管道均由 anode1 进行保护。

为了探究各因素对并行管道干扰的影响规律,各影响参数的选值范围见表 1。利用 BEASY 软件中的后处理模块可以获取管道不同位置处的阴极保护电位、电流密度以及土壤的电位梯度,通过比较以上阴极保护参数随涂层破损率、土壤电阻率、阴极保护电

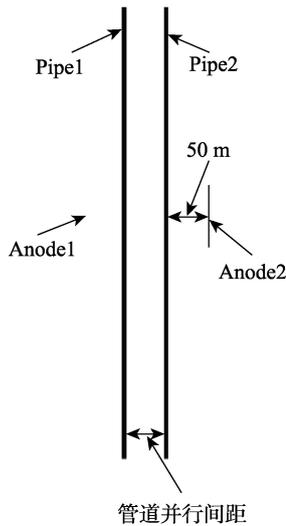


图2 独立设置阴极保护的并行管道模型

Fig.2 Parallel pipeline model under independent cathodic protection

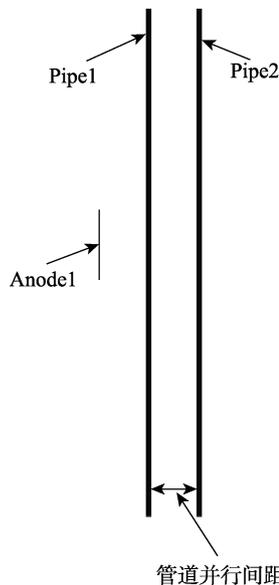


图3 联合阴极保护的并行管道模型

Fig.3 Parallel pipeline model under combined cathodic protection

表1 影响并行管道干扰的参数选值范围
Tab.1 Parameter selection range affecting parallel pipeline interference

参数	选值
管道并行间距/m	5,25,50,75,100
涂层破损率/%	0,1,5,10,50
土壤电阻率/($\Omega \cdot m$)	10,20,100,200
输出电流/mA	1000,5000,10 000
辅助阳极与管道间距/m	30,50,70
管道直径/m	0.3,0.6,1.0

流、并行管道间距等参数的变化，可研究各参数对并行管道间干扰的影响规律。

最后，为探究在管道中心区域附近增大管道并行

间距是否可以减小并行管道之间的干扰，设置的具体模型为：依据图2独立设置阴极保护的并行管道模型，将中心区域（管道5000 m）处管道与辅助阳极向外平移70 m，此时中心区域管道并行间距为80 m，模型如图4所示，其余设置参数不变。

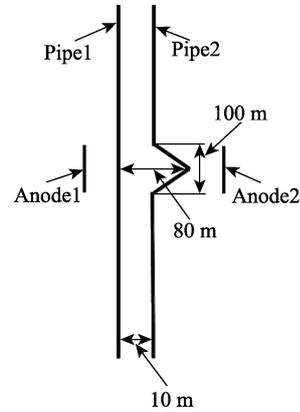


图4 管道中心区域间距为80 m模型

Fig.4 Model of 80 meters spacing in pipe center areas

2 结果与讨论

2.1 并行管道间的干扰规律

管道并行间距为5 m和单根管道阴极保护电位曲线对比如图5所示。由图5可知，相较于单根管道，并行管道在管道中心区域的阴极保护电位减小99.27 mV，而远处位置管道阴保电位略有升高。辅助阳极除保护需保护的管段外，输出的电流还从辅助阳极附近（管道中心区域）流入受干扰管道中。在管道远处区域，由于受保护的管道附近的土壤电位较负，当其他金属管道经过该区域时，受干扰管道中电流会在此位置流出。由极化规律可知，流入管道的电流越大，对应阴保电位值越负，而流出管道的电流将导致阴保电位值变正。因此，并行管道间的干扰同时存在阳极干扰与阴极干扰。在管道中心区域，干扰形式

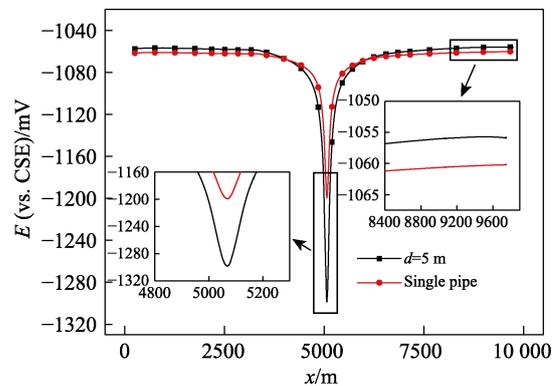


图5 并行管道与单根管道阴保电位比较

Fig.5 Comparison of cathodic protection potential of parallel pipeline and single pipeline

主要为阳极干扰，阴保电位值下降较大；而在管道远处区域，干扰形式主要为阴极干扰，阴保电位值呈上升趋势。

不同并行间距下的阴保电位曲线如图 6 所示。由结果可以发现，随着间距的增加，管道中心区域电位逐渐上升，远处的管道电位略有降低，说明并行管道间相互干扰程度降低。因此，增大并行管道的间距，可以降低并行管道间相互干扰。随着距离增加，保护电位的变化越来越小。间距从 5 m 变为 25 m 时，管道保护电位最负值变化了 23.19 mV；而间距从 75 m 变化至 100 m 时，管道保护电位最负值变化了 7.76 mV。说明管道间距较小时，增大间距对于减小干扰会更加明显。

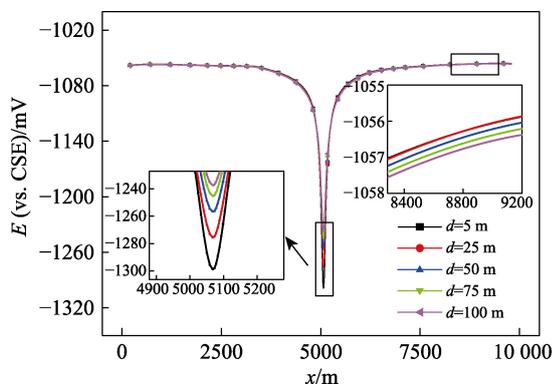


图 6 并行间距变化管道保护电位分布曲线
Fig.6 Distribution curve of protection potential of pipelines with parallel spacing changes

2.2 各参数对三维地形下并行管道间干扰的影响规律

2.2.1 涂层破损率

不同破损率下并行管道与单根管道阴极保护电位最负值的差值如图 7 所示。由模拟结果可以发现，

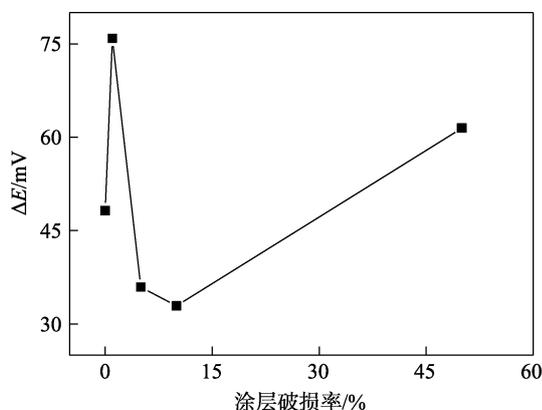


图 7 不同涂层破损率时单管与并行管道保护电位最负值差值曲线

Fig.7 Difference curve of the most negative protective potential of single and parallel pipelines at different coating damage rates

随着破损率的变化，并行管道的干扰规律较为复杂。涂层破损率为 0 时，并行管道间干扰较大；随着涂层开始破损，在小破损率（1%）时，并行管道相互干扰达到峰值；之后随着破损率的增大，并行管道间的干扰先减小，后增大。这是由于流入管道中的电流不变的情况下，较小的涂层破损率（1%）意味着电流密度较大，从而导致局部的阴保电位值变化较大。

2.2.2 土壤电阻率

不同土壤电阻率下，并行管道与单根管道的阴极保护电位最负值差值曲线如图 8 所示。由图 8 可知，并行管道与单管阴极保护电位最负值的差值随土壤电阻率的增加而增大，说明土壤电阻率越大，并行管道间的干扰越严重。较高的土壤电阻率对应较大的土壤电阻，辅助阳极释放的电流无法从较远的区域流入管道，更多的电流从管道中心区域处流入管道，因而导致并行管道间的干扰增加。

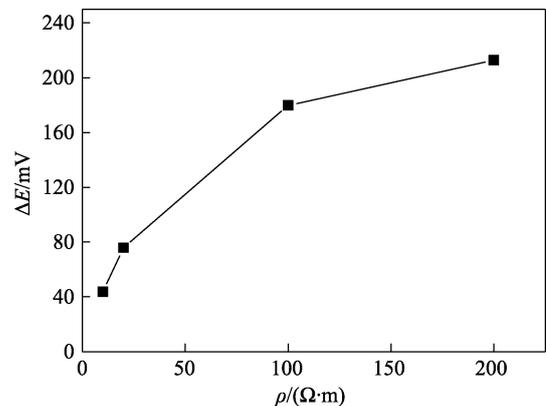


图 8 不同土壤电阻率时单管与并行管道保护电位最负值差值曲线

Fig.8 Difference curve of the most negative protective potential of single and parallel pipelines at different soil resistivity

2.2.3 阳极输出电流

不同阳极输出电流下，并行管道与单根管道的阴极保护电位最负值差值曲线如图 9 所示。由图 9 可直观地发现，随着辅助阳极输出电流的增加，并行管道与单管阴极保护电位最负值的差值也随之增大，且两者呈线性关系。这是由于随着辅助阳极电流值的增加，更多的电流流入受干扰管道，进而导致并行管道间的干扰增加。

2.2.4 辅助阳极与管道间距

不同辅助阳极与管道间距下，并行管道与单根管道的阴极保护电位最负值差值曲线如图 10 所示。由图 10 可知，随着辅助阳极与管道之间间距的增加，单管与并行管道阴极保护电位最负值的差值降低，即并行管道间的干扰也降低。这是由于随着辅助阳极与管道间距的增加，较少的电流流入受干扰管道，进而导致并行管道间的干扰减少。

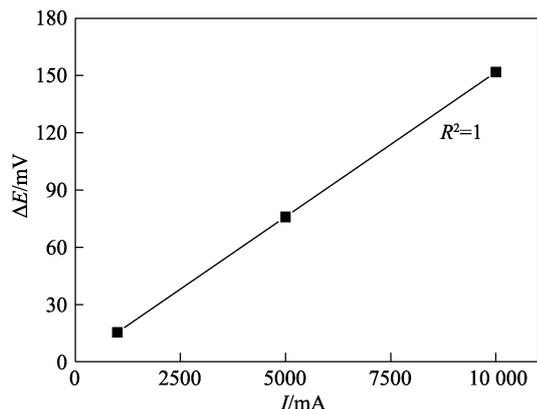


图9 不同输出电流下单管与并行管道保护电位最负值差值曲线

Fig.9 Difference curve of the most negative protective potential of single and parallel pipelines at different output currents

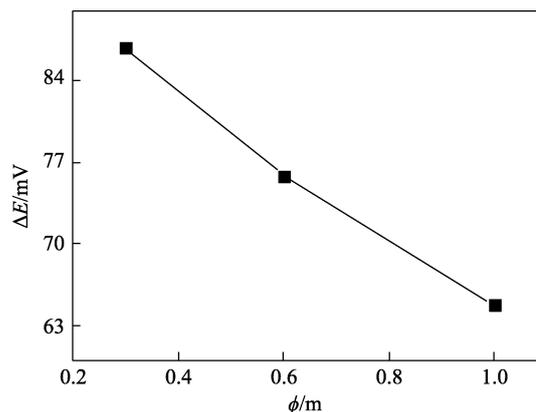


图11 不同管道直径下单管与并行管道保护电位最负值差值曲线

Fig.11 Difference curve of the most negative protective potential of single and parallel pipelines at different pipe diameters

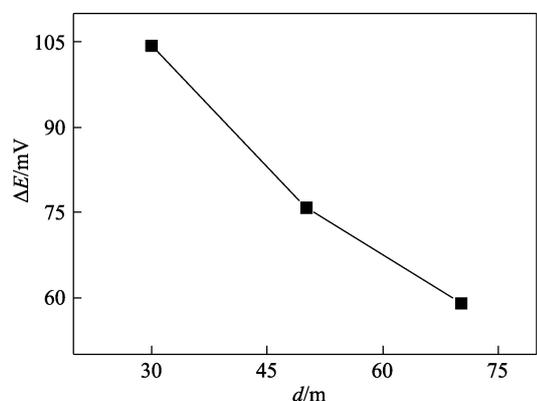


图10 不同辅助阳极与管道间距下单管与并行管道保护电位最负值差值曲线

Fig.10 Difference curve of the most negative protective potential of single and parallel pipelines at different spacing of different auxiliary anode and pipe

2.2.5 管道直径

不同管道直径下,并行管道与单根管道的阴极保护电位最负值差值曲线如图11所示。由图11可知,管道直径越小,并行管道间干扰越严重。这是由于随着管道直径的减小,管道表面积也随之减小,流入管道的电流密度值更大,进而导致并行管道间的干扰增加。

2.3 不同因素对并行管道干扰范围的影响规律

目前,国内外有很多规范规定了管道之间的并行间距,也有许多并行管道工程实例给出规定的并行间距^[21]。以上规范多基于输油管道温降、输气管道破裂、施工维修等方面的考虑,基于并行管道阴极保护干扰考虑给出的并行间距却很少,此外对并行管道阴极保护系统间干扰影响范围的界定研究也极为匮乏。由图6可知,随着并行间距的增加,并行管道间的干扰降低,且干扰程度逐渐变小,即管道阴极保护电位在管道并

行间距大于一定值后变化缓慢。因此文中对并行管道阴极保护系统间干扰影响范围的界定如下:管道阴极保护电位最负值增长速率出现明显减缓的点即为并行管道相互干扰范围,大于该间距后,并行管道间干扰可忽略,因此这个间距就是文中推荐的合理并行间距。

2.3.1 独立设置阴极保护的并行管道干扰范围

1) 不同输出电流下管道阴极保护电位的最负值随管道并行间距的变化曲线如图12所示。由图12可知,当输出电流增大时,管道电位最负值随着并行间距的变化幅度逐渐升高,但变化趋势几乎不变。在管道并行间距大于80m以后,管道电位变化趋于平缓。因此,并行管道的干扰范围为80m,且不随输出电流的变化而变化。

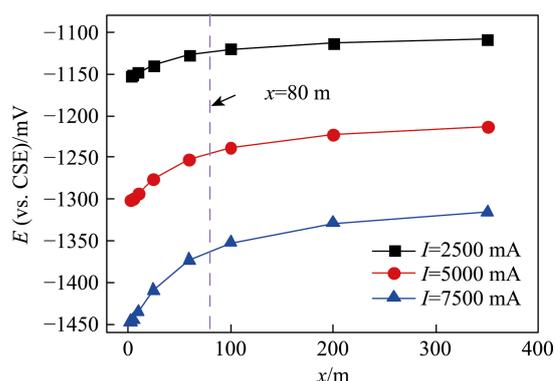


图12 不同输出电流下管道电位最负值随管道并行间距的变化曲线

Fig.12 Variation curve of the most negative potential value with parallel pipeline spacing under different output currents

2) 不同土壤电阻率下管道阴极保护电位的最负值随管道并行间距的变化曲线如图13所示。由图13可知,在管道并行间距大于80m以后,管道阴极保护电位趋于平缓。因此,并行管道的干扰范围为80m,且不随土壤电阻率的变化而变化。

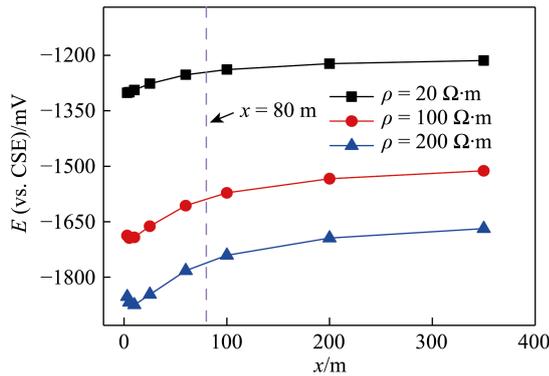


图 13 不同土壤电阻率下管道电位最负值随管道并行间距的变化曲线
Fig.13 Variation curve of the most negative potential value with parallel pipeline spacing under different soil conductivity

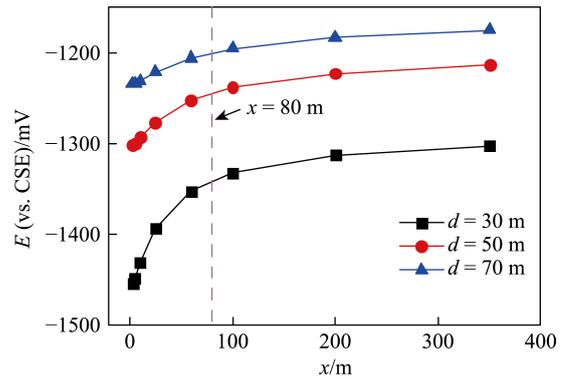


图 15 不同辅助阳极与管道间距管道电位最负值随管道并行间距的变化曲线
Fig.15 Variation curve of the most negative potential value with parallel pipeline spacing under different distance between the auxiliary anode and the pipeline

3) 不同涂层破损率下管道阴极保护电位的最负值随管道并行间距的变化曲线如图 14 所示。由图 14 可知,管道并行间距大于 80 m 以后,管道阴极保护电位趋于平缓。因此,并行管道的干扰范围为 80 m,合理并行间距为 80 m,且不随涂层破损率的变化而变化。

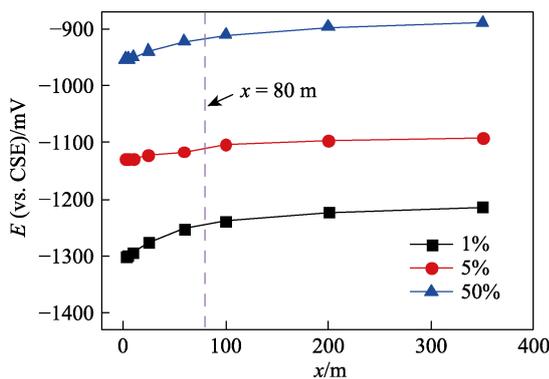


图 14 不同涂层破损率下管道电位最负值随管道并行间距的变化曲线
Fig.14 Variation curve of the most negative potential value with parallel pipeline spacing under different coating damage rate

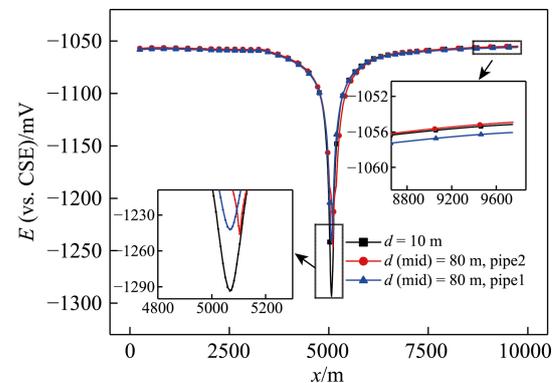


图 16 增大中心区域处管道间距后管道的电位分布
Fig.16 Potential distribution of pipelines after increasing the distance between pipelines in the central area

4) 不同辅助阳极与管道间距下,管道阴极保护电位的最负值随管道并行间距的变化曲线如图 15 所示。由图 15 可知,在管道并行间距大于 80 m 以后,管道阴极保护电位趋于平缓。因此辅助阳极与管道间距的变化对管道并行间距无影响,仍为 80 m。

由图 16 可知,管道中心区域处的间距增大 80 m,可使管道全线保护电位最负值升高近 50 mV,而管道其他位置处保护电位变化不大,大大降低了并行管道间的干扰。因此当并行管道分别设立阴极保护时,推荐在辅助阳极位置附近处增大管道间距,这样可以大大降低并行管道间阴极保护的干扰。

2.3.2 联合阴极保护的并行管道干扰范围

管道全线保护电位最负值与管道并行间距之间

的关系曲线如图 17 所示。由图 17 可知,随着管道并行间距的增加,靠近辅助阳极的管道 1 上的保护电位最负值缓慢降低,管道 2 上的保护电位最负值随管道并行间距的增加而迅速增加。因此进行管道联合阴极保护时,管道之间的并行间距不宜过大,推荐并行间距小于 7 m。

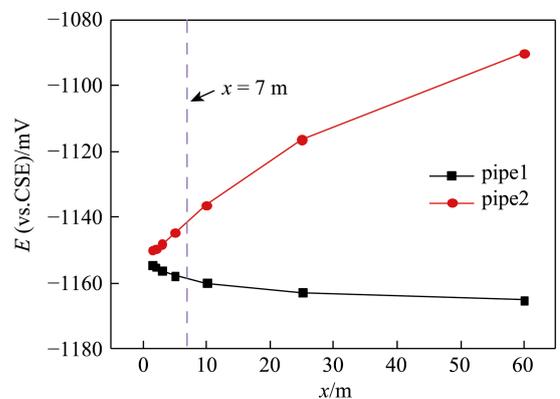


图 17 管道电位最负值随管道并行间距的变化曲线
Fig.17 Variation curve of the most negative value of pipeline potential with the distance between parallel pipelines

3 结论

通过数值模拟的手段研究了并行管道间的干扰规律,得出如下主要结论。

1) 三维地形下并行管道存在干扰,干扰规律为管道中心区域保护电位变负,远处管道保护电位变正。随着并行间距的增加,干扰逐渐减弱,且随着距离的增加,其干扰减小速率逐渐减缓。

2) 涂层破损率对并行管道干扰规律较复杂,涂层破损率为0时,并行管道间干扰较大;随着涂层开始破损,达到较小破损率(1%)时,并行管道间相互干扰最大;之后随着破损率的增大,干扰先减小,后增大。土壤电阻率越大,阳极输出电流越大,辅助阳极距管道距离越近,管道直径越小,并行管道间干扰越剧烈。

3) 对于独立设置阴极保护的并行管道,考虑了不同的输出电流、不同土壤电阻率、不同涂层破损率以及不同的辅助阳极与管道之间的间距等情况,均发现当并行间距超过80 m后,管道保护电位趋于平缓。因此为了减小并行管道间的干扰,建议管道并行间距大于80 m。

4) 联合阴极保护的并行管道,随并行管道间距的增加,距离辅助阳极较远的管道保护电位迅速上升。因此为了保证并行的两条管道均能受到良好的阴极保护,建议管道并行间距宜小于7 m。

参考文献:

- [1] 李自力, 谢跃辉, 郝宏娜, 等. 埋地管道阴极保护电位测量方法研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(1): 55-59.
LI Zi-li, XIE Yue-hui, HAO Hong-na, et al. Research Progress of Measurement Methods for Cathodic Protection Potential of Buried Pipelines[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(1): 55-59.
- [2] ALIREZA B. Cathodic Corrosion Protection Systems[M]. Houston: Gulf Professional Publishing, 2014: 1-34.
- [3] 张艳禹, 李雨, 倪慧. 阴极保护原理及应用[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(3): 22-24.
ZHANG Yan-yu, LI Yu, NI Hui. The Principle and Application of Cathodic Protection[J]. Total Corrosion Control, 2015, 29(3): 22-24.
- [4] 胡士信. 管道阴极保护技术现状与展望[J]. 腐蚀与防护, 2004, 25(3): 93-101.
HU Shi-xin. Status and Prospects of Pipeline Cathodic Protection Technology[J]. Corrosion & Protection, 2004, 25(3): 93-101.
- [5] 闫金旺. 油气管道阴极保护技术现状分析及展望[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(8): 32-33.
YAN Jin-wang. Current Situation Analysis and Prospect of Cathodic Protection Technology for Oil and Gas Pipelines[J]. Total Corrosion Control, 2019, 33(8): 32-33.
- [6] 张微. 浅谈强制电流阴极保护系统运维中存在的问题及解决办法[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(10): 83-84.
ZHANG Wei. The Problems Existing in the Operation and Maintenance of Forced Current Cathodic Protection System and Their Solutions are Briefly Discussed[J]. Total Corrosion Control, 2019, 33(10): 83-84.
- [7] 王君珂. 对城市输气管网加阴极保护装置检测应用[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(9): 59-63.
WANG Jun-ke. Detection and Application of Cathodic Protection Device in urban Gas Transmission Network[J]. Total Corrosion Control, 2019, 33(9): 59-63.
- [8] 郑海岩. 应用均压线连接对多条管道实施强制电流阴极保护[J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32(9): 39-41.
ZHENG Hai-yan. Cathodic Protection Technology with Equal Potential Wire Connection Applied on the Pipelines[J]. Total Corrosion Control, 2018, 32(9): 39-41.
- [9] 代以斌, 孙春良, 单蕾, 等. 长输油气管道并行敷设阴极保护防干扰分析[J]. 石油与天然气化工, 2010, 39(6): 557-560.
DAI Yi-bin, SUN Chun-liang, SHAN Lei, et al. Anti-Interferometric Analysis of Cathode Protection for Long-distance Parallel Laying Pipeline[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2010, 39(6): 557-560.
- [10] XU L Y. Effect of Alternating Current on Cathodic Protection on Pipelines[J]. Corrosion Science, 2013(66): 263-268.
- [11] 王文涛. 高压交、直流电力设施对埋地管道的干扰危害及检测[J]. 石油化工与设备, 2009(9): 51-55.
WANG Wen-tao. Hazards and Detection of High Voltage AC and DC Power Facilities on Buried Pipelines[J]. Petro & Chemical Equipment, 2009(9): 51-55.
- [12] 金光彬. 相邻管线阴极保护系统之间的干扰规律[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(4): 306-310.
JIN Guang-bin. Mutual Interference between Cathodic Protection Systems of Adjacent Pipelines[J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(4): 306-310.
- [13] SHAN Q, CHENG Y F. Accelerated Corrosion of Pipeline Steel and Reduced Cathodic Protection Effectiveness under Direct Current Interference[J]. Construction and Building Materials, 2017, 148(1): 675-685.
- [14] 王爱玲, 李文雷. 500 kV 高压直流输电接地系统对山区天然气管道电干扰检测及分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(5): 537-543.
WANG Ai-ling, LI Wen-lei. Detection and Analysis of Interference with Natural Gas Pipeline in Mountainous Area from Grounding Grid of 500 kV Direct Current Power Transmission System[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31(5): 537-543.
- [15] 胡海文. 山区特殊地段长输管道的阴极保护设计[J]. 油气储运, 2005, 24(5): 37-40, 66-67.
HU Hai-wen. Cathodic Protection Design for Mountainous Long-distance Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2005, 24(5): 37-40, 66-67.
- [16] 李丹丹, 毕武喜, 祁慧爽, 等. 交叉并行管道阴极保护

- 干扰数值模拟[J]. 油气储运, 2014, 33(3): 287-291.
- LI Dan-dan, BI Wu-xi, QI Hui-shuang, et al. Numerical Simulation of Cathodic Protection Interference in Cross/Parallel Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(3): 287-291.
- [17] 李自力, 崔淦. 长输管线阴极保护电位分布的数值模拟[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(6): 468-470.
- LI Zi-li, CUI Gan. Numerical Simulation of Cathodic Protection Potential Distribution in Long-distance Pipelines[J]. Corrosion & Protection, 2013, 34(6): 468-470.
- [18] CUI Gan, LI Zi-li. Study on the Interference Corrosion of Cathodic Protection System[J]. Corrosion Reviews, 2015, 33(5): 233-247.
- [19] QIAO Guo-fu, GUO Bing-bing. Numerical Optimization of an Impressed Current Cathodic Protection System for Reinforced Concrete Structures[J]. Construction and Building Materials, 2016, 119: 260-267.
- [20] 张玉志, 王玉梅, 刘玲莉, 等. 数值仿真技术在长输管道阴极保护中的应用进展[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(12): 969-971.
- ZHANG Yu-zhi, WANG Yu-mei, LIU Ling-li, et al. Applied Development of Numerical Simulation Technology in Pipeline Cathodic Protection[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(12): 969-971.
- [21] 郭小强, 黄丽, 张黎明, 等. 油气长输管道并行敷设间距设计[J]. 油气储运, 2009, 28(9): 46-48.
- GUO Xiao-qiang, HUANG Li, ZHANG Li-ming, et al. Design of Parallel Laying Spacing of Oil and Gas Long-distance Pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(9): 46-48.