

脉冲电流阴极保护技术在油井套管上的应用

周好斌, 张涛, 许庆

(西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065)

摘 要: 油井套管外腐蚀是套管失效的最主要形式,严重制约了油田的作业和开发。阴极保护技术已广泛应用于油井套管系统的防腐蚀保护。实践证明,该技术是目前使用最广泛、最有效的油井套管防腐蚀技术。然而,基于脉冲电流的阴极保护技术在油井套管中还没有相关应用。理论研究和模拟实验证明,脉冲电流阴极保护技术具有电流分布更均匀,总电流需求更低,保护深度更深,耗能更低等诸多优点。通过介绍脉冲电流阴极保护技术的历史、研究进展、应用条件等,对油井套管阴极保护技术进行了综述;探讨了油井套管脉冲电流阴极保护基本参数的影响规律;总结了对该技术保护效果的评价,并对其保护效果进行了展望。

关键词: 油井套管; 腐蚀; 套管失效; 阴极保护; 脉冲电流; 保护深度

中图分类号: TG174.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)10-0099-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.10.017

Application of Pulse Current Cathodic Protection Technology in Oil Well Casing

ZHOU Hao-bin, ZHANG Tao, XU Qing

(School of Material Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: Objective Corrosion in the oil well casing is the main form of casing failure, which severely restrict the operation and development of oil fields. Cathodic protection technology has been widely used in oil well casing corrosion protection systems, and the practice proved that the technology is currently the most widely used and most effective oil well casing corrosion protection technology. However, there is so far no related application of cathodic protection technology based on pulse current in oil well casing. Theoretical research and simulation experiments show that pulse current cathodic protection technology has a number of advantages such as more uniform distribution of current, lower total current demand, deeper protection depth, and lower energy consumption. In this paper, through the introduction of the history, research progress and application conditions of pulse current cathodic protection technology, the well casing cathodic protection technologies were reviewed; the influencing law of basic parameters of oil well casing pulse current cathodic protection was discussed, the protective effects of the technique were summarized, and the protective effect was discussed.

收稿日期: 2015-06-05; 修订日期: 2015-07-24

Received: 2015-06-05; Revised: 2015-07-24

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2013KTCL-04)

Fund: Supported by Shaanxi Provincial Science and Technology Innovation Project Coordinating Projects(2013KTCL-04)

作者简介: 张涛(1990—),男,陕西人,硕士研究生,主要从事腐蚀与防护研究。

Biography: ZHANG Tao(1990—), Male, from Shaanxi, Master graduate student, Research focus: corrosion and protection.

通讯作者: 周好斌(1965—),男,陕西人,博士,教授,主要从事腐蚀与防护技术、焊接设备与工艺研究。

Corresponding author: ZHOU Hao-bin(1965—), Male, from Shaanxi, Ph. D., Professor, Research focus: corrosion and protection technology, welding equipment and technology.

KEY WORDS: oil well casing; corrosion; casing failure; cathodic protection; pulse current; protection depth

油井套管脉冲电流阴极保护技术距今已经有四十多年的发展历史,但是人们对其机理以及保护效果的研究还很匮乏,油田现场应用实例的缺乏在很大程度上限制了该技术的应用发展。国内在阴极保护方面做了很多研究,但在油井套管脉冲电流阴极保护方面的研究工作却还很少。由于油井套管脉冲电流阴极保护技术电流分布更均匀,总电流需求更低,保护深度更深,耗能更低等诸多优越性,因此针对该技术的保护规律和效果有必要进行深度研究。

1 油井套管的腐蚀

油井套管与土壤接触时,随着时间的推移,进入土壤的离子越来越多,而留在表面的电子也越来越多。由于电子对离子的吸引力,金属的离子化倾向越来越困难,最后达到平衡。土壤中,金属以离子形式进入电解质,由于不同金属的电位差,产生原电池效应而导致了油井套管腐蚀的发生^[1]。

套管腐蚀破裂过程大致为:套管—表面腐蚀—腐蚀介质侵蚀金属—套管受侵蚀破坏—出现应力—在拉应力和局部腐蚀作用下出现裂纹—拉应力使裂纹迅速扩大—开裂。

2 油井套管脉冲电流阴极保护技术的发展

2.1 国外研究进展

油井套管是油井中用于固井和保护油管的重要设施,外加电流阴极保护是防止套管外壁腐蚀的标准措施,是国外油田广泛采用的方法^[2]。

早在 1965 年,California 的 Huntington Beach 油田就在丛生井的套管中成功应用了阴极保护技术^[3],但自此之后的近 20 年,人们对该技术的研究仍然非常少。一直到 20 世纪 90 年代,Shell 才开始对油田深井套管进行阴极保护的现场实践和研究,并由 Nguyen 和 Jerry^[4-5]发表了相关的研究结果。研究表明,在对油井套管施加阴极保护技术后,脉冲电流技术相比传统的直流阴极保护主要有如下优点:超过三四千米的保护深度、不到直流技术一半的平均输出电流、更加均匀的电流分布^[6-10]。然而,截至目前,该技术相关

的应用研究仍然不多,该技术还未得到普遍的认同和广泛的应用^[11-12]。制约该技术发展的主要原因是:对此项技术保护机理和保护效果缺乏更进一步的研究以及缺乏该技术的实际应用研究^[13-14]。

2.2 国内研究进展

我国从 1983 年才开始对大庆、延长油田等油井采用阴极保护生产试验,并取得了很好的保护效果。20 世纪 90 年代至今,在宁波杭州湾跨海大桥、天津塘沽海港等大型码头以及西气东输工程中也已经应用了阴极保护技术。但是到目前为止,国内还没有实际应用油井套管脉冲电流阴极保护的报道,也没有相关技术的研究动态。所以对脉冲电流阴极保护技术的研究和对该技术的应用推广很有价值^[15-16]。邱于兵等^[17]对方波脉冲电流阴极保护的机理做了许多研究,通过大量模拟实验证明了此技术的优越性。然而,由于实际条件的限制和对经济因素的考虑,该技术还无法在现场实现。

2.3 应用

通过多年的脉冲电流阴极保护实践可以得出,脉冲电流阴极保护是非常经济、有效的防止套管外壁腐蚀的方法,保护效果十分显著^[18-19]。然而,在油井套管的阴极保护过程中,仍然存在一些急待解决的问题,其中最突出最难解决的问题就是延长油井套管的保护深度^[20]。

早期投入使用的油井套管,一直存在油井套管阴极保护状况测试技术、评价方法、评价手段以及保护设备落后的问题^[21],导致局部套管处于欠保护状态^[22]。对现有油井套管脉冲电流阴极保护系统改造之前,有必要改造现有油井套管阴极保护设施,调整阴极保护系统运行参数,综合评价系统运行情况,以达到控制油井套管腐蚀的目的。

1990 年左右,Shell Canada Ltd. 开展了油井套管脉冲电流阴极保护现场应用的可行性研究。1994—1995 年 Nguyen N. Bich 等^[23-25]发表了现场研究成果:采用脉冲电流时,所需平均电流较小、电流分布较为均匀、杂散电流干扰较小,保护深度明显延长。该技术的主要问题在于对机理缺乏了解,应用经验几乎没有,安全系数不确定以及电子设备成本过高等。因此,在电化学保护机理、实际安装与应用、保护性能等

方面还需要做大量的工作。

Jerry Bauman 等的现场研究表明,脉冲电流阴极保护在套管系统中有诸多优越性,同时客观分析了所包含的缺陷,但对于该系统的保护机理没有系统研究。为了解释套管表面电流分布更加均匀的现象,他们根据套管系统的等效电路模型进行了计算。结果显示,在 100 Hz 左右的低频下,脉冲电流和直流的保护效果几乎没有差别,只有在 1880 Hz 的高频下,电流分布才明显改善。J. Dabkowski^[6] 根据类似的等效电路模型进行了计算,系统设定为深 3000 m 的单井套管系统。计算结果表明,脉冲电流成分在百米以下的深度就已经大大削减。由于 J. Dabkowski^[7] 的计算模型同样采用纯线性元件,导致采用的各元件的参数是否恰当无法进行判断。这种模拟计算的可信度不可靠,需要提出更优化的方法去验证。

3 基本参数影响规律及保护效果

国外在海水和土壤等介质中已经有很多年的脉冲电流阴极保护实践经验,保护参数可以根据经验数据选取^[27—28]。由于对油井套管脉冲电流阴极保护积累的经验数据较少,因此在进行保护之前,要先进行模拟实验,根据实验方案,确定保护参数的调整范围,然后根据实验效果、电能消耗以及“过保护”等情况进行综合分析,最后再选定合理的保护参数。

在阴极保护系统中,相关的参数有自然腐蚀电位、保护电位和保护电流,其中选择和控制保护电位和保护电流是关键,保护电位是最为重要的判定依据。在实际操作过程中将保护电位作为主要的考量指标^[30—33]。对于油井套管脉冲电流阴极保护技术,目前可以得出的结论有:采用脉冲电流时,平均电流较小,电流分布均匀,保护深度明显延长,但是在脉冲电流作用下,套管表面电流分布会更加均匀的原因还不清楚。方波脉冲电流的频率、幅值以及占空比等参数值的影响规律,及彼此的关联性目前还不清楚。因此,在其电化学保护机理、实际应用、保护性能等方面还有待深入。

对于油井套管脉冲电流阴极保护的效果评价,需要根据实际情况,将 IR 降等重要参数考虑进去。而 IR 降主要由阴极保护电流和土壤电阻 R 决定,并且还存在着某些随机的影响因素,而油井套管纵深地下达数千米,对于保护电位的测量方法除了井口很难通过其他部位进行测量,而且测量到的数据也只能得出保

护电位沿油井套管分布的程度,保护规律和套管表面受保护程度还是无法直接掌握,因此保护效果也就难以精确测定^[35—38],而目前仍未找到简便有效的测量方法。

综上所述,虽然脉冲电流阴极保护在技术及应用方面仍然存在问题,但是基于脉冲电流的油井套管阴极保护优越性已经逐步体现出来,目前对于油井套管脉冲电流阴极保护的机理和保护效果认知还远远不够,还需要对其机理进行深入研究^[39—42],并进行大量的实验室模拟实验或者现场应用试验,通过技术与实际应用相结合,促使该技术不断向前发展^[43—45]。

4 效果评价方法

油井套管脉冲电流阴极保护系统十分复杂,其中油井套管往往要深入地下几千米,不同油田不同的油井套管阴极保护系统所处的地质环境也不尽相同。因此,不能简单地将参比电极直接放置在地下套管附近来测量不同深度的油井套管阴极保护电位,只有通过测量地面井口处的保护电位来反映套管的保护情况,然而这种保护效果评价方法无法准确得知地下套管的保护电位,不能客观反应套管的实际保护情况。

目前主要的评价方法有 E -log I 法和井下电位剖面法^[46],还有通过建立保护测量参数数学模型的保护效果评价方法。此方法可以通过测量井口处的套管阴极保护电位和保护电流等相关参数,计算出油井套管任意深度处的阴极保护电位,这种方法已经在我国胜利油田成功应用,并且误差不超过 8%,有效地反应了套管的保护情况^[47—49]。

经过实际检验,以上 3 种方法均已应用到了油井套管直流电流阴极保护系统中,而脉冲电流阴极保护的影响参数更为复杂,保护效果的评价难度更大。对油井套管实施脉冲电流阴极保护后,其保护效果和保护的有效期应根据保护判据进行测量和分析^[50]。目前,国内最常用的方法是测量通电电位。而管/地电位测量值中存在各种电流和电阻所产生的 IR 降。 IR 降会影响脉冲电流阴极保护的效果。保护电位测量中由于杂散电流和 IR 降的存在,会影响电位测量的精确度。最近几年虽然涌现出了诸如断电法等消除 IR 降的测量技术,但由于它们需要承担额外的装置费用,并且还不能确保完全消除 IR 降,难以得到真正的推广应用,因此在 IR 降方面还有大量的工作需要去做。

综上所述,提出合理的油井套管脉冲电流阴极保护效果评价方法,对油井套管脉冲电流阴极保护的效果进行评价,在套管安全、油田产业开发,经济利益等各方面的作用都十分重要。

5 总结与展望

阴极保护技术是截至目前国内外均公认的最有效的防腐蚀方法,基于脉冲电流的阴极保护又是建立在此基础上更有效的保护方法,对于油井套管系统,脉冲电流阴极保护拥有直流电流不可比拟的更好的优越性。参考国外及国内相关文献和应用报道总结得出,油井套管脉冲电流阴极保护已经在国外小范围内得到应用,而且脉冲电流阴极保护所具有的优越性已经得到不断证明。

由于关于油井套管脉冲电流阴极保护的机理和保护效果以及客观影响因素还很缺乏深入研究,因此根据油井套管脉冲电流阴极保护技术的发展现状以及未来的发展前景来看,对该技术的进一步开发和应用研究很有必要。

参考文献

- [1] 王军,毕宗岳. 油套管腐蚀与防护技术发展现状[J]. 焊管,2013,36(7):57—62.
WANG Jun, BI Zong-yue. Oil Casing Corrosion and Protection Technology Development[J]. Journal of Welded Pipe, 2013,36(7):57—62.
- [2] BICH N N, BAUMAN J. Pulsed Current Cathodic Protection of Well Casings[J]. Materials Performance, 1995, 34(4): 17—21.
- [3] MORGAN J. Cathodic Protection[M]. Texas: National Association of Corrosion Engineers, 1987.
- [4] THADDENS M, HARRY J K. Pulse Current Cathodic Protection Power Supply and Methods; US, 3612898[P]. 1971-07-28.
- [5] POLDER R B. Service Life and Life Cycle Cost Modelling of Cathodic Protection Systems for Concrete Structures[J]. Elsevier Ltd, 2014, 3(6): 69—74.
- [6] BALLA E. System Identification Modelling and Imc Based Pid Control of Impressed Current Cathodic Protection Systems[J]. Massey University, 2013, 6(5): 2055—2074.
- [7] PARSAM H. Simulation of Cathodic Protection Potential Distribution on Oil Well Casings[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 72(4): 215—219.
- [8] BICH N N, BAUMAN J. Pulsed Current Cathodic Protection of Well Casings[J]. Materials Performance, 1995, 34(4): 17—19.
- [9] METWALLY I. Factors Affecting Pulsed-cathodic Protection Effectiveness for Deep Well Casings[J]. Anti-corrosion Methods and Materials, 2009, 56(4): 196—205.
- [10] MILTIADOU P, WROBELL C. Optimization of Cathodic Protection Systems using Boundary Elements and Genetic Algorithms[J]. Corrosion, 2002, 58(11): 912—921.
- [11] BHUIYAN S. The Impact of the Interruption of Impressed Current Cathodic Protection on the Steel/Concrete Interface[J]. CRC Press/Balkema, 2014, 32(5): 153—159.
- [12] MARIA C. Cathodic Protection of Well Casings in the At-tahaddy Gas Field[J]. Corrosion, 2006, 49(7): 12—15.
- [13] DONIGUIANT M. Pulsed Rectifier Improves Cathodic Protection[J]. Oil and Gas Journal, 1982, 80(30): 221—229.
- [14] DABOKOWSKI J. Cathodic Protection of Oil and Gas Well Casings[C]//Materials Performance, 2008.
- [15] 李超, 刘庆洪. 套管阴极保护技术[J]. 油气田地面工程, 2013, 32(8): 92—95.
LI Chao, LIU Qing-hong. Casing Cathodic Protection Technology[J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 2013, 32(8): 92—95.
- [16] 谢文江, 魏斌, 陈娟利, 等. 含 H_2S/CO_2 气田油套管腐蚀与防护技术[J]. 油气储运, 2010, 29(2): 93—96.
XIE Wen-jiang, WEI Bin, CHEN Juan-li, et al. Gas Field Containing H_2S/CO_2 Oil Casing Corrosion and Protection Technology[J]. Journal of Oil and Gas Storage and Transportation, 2010, 29(2): 93—96.
- [17] 邱于兵, 郭稚弧, 林汉同, 等. 脉冲电流阴极保护技术[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(4): 226—229.
QIU Yu-bing, GUO Zhi-hu, LIN Han-tong, et al. Pulsed Current Cathodic Protection Technology[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2001, 13(4): 226—229.
- [18] 周兰, 陶文亮, 李龙江. 埋地钢质管道强制电流阴极联合保护研究[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 118—122.
ZHOU Lan, TAO Wen-liang, LI Long-jiang. Buried Steel Pipeline Joint Impressed Current Cathodic Protection Study[J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 118—122.
- [19] 王庆英. 油井套管腐蚀机理与防腐工艺[J]. 中国新技术新产品, 2010, 5(16): 25—28.
WANG Fu-qing. Oil Well Casing Corrosion Mechanism and Anti-corrosion Technology[J]. China's New Technology and New Products, 2010, 5(16): 25—28.
- [20] 张雄文. 井下油管的防护措施[J]. 内蒙古石油化工, 2010(10): 59—64.
ZHANG Xiong-wen. The Downhole Tubing Protective Measures[J]. Journal of Inner Mongolia Petrochemical Industry,

- 2010(10):59—64.
- [21] 黄永昌,张建旗.现代材料腐蚀与防护[M].上海:上海交通大学出版社,2012.
- HUANG Yong-chang, ZHANG Jian-qi. Modern Material Corrosion and Protection[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2012.
- [22] 谢成龙.油井的腐蚀及防护技术[J].山东工业技术, 2013, (10):33—38.
- XIE Chen-long. Oil Well Corrosion and Protection Technology[J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2013, (10):33—38.
- [23] 路民旭.现代阴极保护的几个前沿技术[C]//NACE 中国分会 2010 年技术年会暨石油化工腐蚀控制技术研讨会, 2010.
- LU Min-xu. Modern Cathodic Protection of Several Cutting-edge Technology[C]// NACE China Branch Technology Conference in 2010 and Petroleum and Chemical Corrosion Control Technology Seminar, 2010.
- [24] 张华倩.油井管腐蚀现状与防护技术初探[J].中国石油和化工标准与质量, 2012(10):66—71.
- ZHANG Hua-qian. Oil Well Pipe Corrosion Status and Protection Technology[J]. Journal of China Petroleum and Chemical Industry Standard and Quality, 2012(10):66—71.
- [25] 陈光章,吴建华.阴极保护技术的新进展[C]//中国腐蚀与防护学会成立 20 周年论文集.北京:中国腐蚀与防护学会, 1999.
- CHEN Guang-zhang, WU Jian-hua. New Progress in Cathodic Protection Technology[C]//Proceedings of the 20th Anniversary of the Founding of the Chinese Society of Corrosion and Protection. Beijing: Chinese Society for Corrosion and Protection, 1999.
- [26] 丁继峰,高志贤.油井套管外壁阴极保护技术概述[J].全面腐蚀控制, 2013, 14(9):34—36.
- DING Ji-feng, GAO Zhi-xian. The outer Wall of Oil Well Casing Cathodic Protection Technology Overview[J]. Journal of Comprehensive Corrosion Control, 2013, 14(9):34—36.
- [27] 贝克曼 W V.阴极保护手册[M].北京:人民邮电出版社, 1990.
- BECKMAN W V. Manual of Cathodic Protection[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 1990.
- [28] 胡士信.阴极保护工程手册[M].北京:化学工业出版社, 1999.
- HU Shi-xin. Manual of Cathodic Protection[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1999.
- [29] 张丰,陈洪源,李国栋,等.数值模拟在管道和站场阴极保护中的应用[J].油气储运, 2011, 30(3):208—212.
- ZHANG Feng, CHEN Hong-yuan, LI Guo-dong, et al. Numerical Simulation in the Pipeline and Station, the Application of Cathodic Protection[J]. Journal of Oil and Gas Storage and Transportation, 2011, 30(3):208—212.
- [30] 张丰,郑军,彭鹏,等.电流密度与管中电流对阴极保护的影响[J].油气储运, 2014, 33(8):86—90.
- ZHANG Feng, ZHENG Jun, PENG Peng, et al. The Impact of Current Density and the Tube Current on Cathodic Protection[J]. Journal of Oil and Gas Storage and Transportation, 2014, 33(8):86—90.
- [31] 李正奉,甘复兴.脉冲阴极保护下缝隙内的电化学反应[C]//全国腐蚀电化学测试方法专业委员会 2002 年学术交流论文集, 2002.
- LI Zheng-feng, GAN Fu-xing. Pulse Electrochemical Behavior in the Crack under Cathodic Protection[C]//The Corrosion Electrochemical Test Methods of Professional Committee of Academic Conference Proceedings, 2002.
- [32] 张丰,齐晓忠,金宏,等.试片断电法在管道阴极保护中的应用[J].油气储运, 2013, 32(7):760—763.
- ZHANG Feng, QI Xiao-zhong, JIN Hong, et al. Fragments of Test Method in the Application of Pipeline Cathodic Protection[J]. Journal of Oil and Gas Storage and Transportation, 2013, 32(7):760—763.
- [33] 徐兴龙,周好斌,袁森.脉冲电流与直流电流的阴极保护效果比较研究[J].表面技术, 2015, 44(1):133—135.
- XU Xing-long, ZHOU Hao-bin, YUAN Sen. Pulse Electric Current and Direct Current Cathodic Protection Effect Comparison Study[J]. Surface Technology, 2015, 44(1):133—135.
- [34] 邱于兵,郭稚弧,林汉同.方波脉冲电流阴极保护机理研究:电位响应波形特征[J].中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(5):295—298.
- QIU Yu-bing, GUO Zhi-hu, LIN Han-tong. Square Wave Pulse Current Cathodic Protection Mechanism Research: Potential Response Waveform Characteristics[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2002, 22(5):295—298.
- [35] 李程.塔河油田管道阴极保护电位测试与分析[J].腐蚀与防护, 2012(2):173—175.
- LI Cheng. The Oilfield Pipeline Cathodic Protection Potential Tests and Analysis[J]. Journal of Corrosion and Protection, 2012(2):173—175.
- [36] 张立新.地下输水管道阴极保护实验分析[J].水利水电技术, 2010, 41(3):34—37.
- ZHANG Li-xin. Underground Pipeline Cathodic Protection Test Analysis[J]. Journal of Water Resources and Hydropower Technology, 2010, 41(3):34—37.

- [37] 常守文,赵培然.井套管阴极保护电位地面测量方法的进展[J].腐蚀科学与防护技术,1990,2(4):184—190.
CHANG Shou-wen, ZHAO Pei-ran. Progress of Ground Measurement Method for Well Casing Cathodic Protection Potential[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1990,2(4):184—190.
- [38] 杨永刚,王宝明.丛式井组套管阴极保护新技术研究与应用[J].石油化工应用,2013,32(3):70—73.
YANG Yong-gang, WANG Bao-ming, et al. Cluster Well Group Casing Cathodic Protection New Technology Research and Application[J]. Journal of Petrochemical Industry Applications, 2013,32(3):70—73.
- [39] 王燕.某油库区域阴极保护实践[J].腐蚀与防护,2011,32(7):601—603.
WANG Yan. Cathodic Protection in Oil Depot Area Practice[J]. The Corrosion and Protection, 2011,32(7):601—603.
- [40] 邱于兵,郭稚孤,林汉同,等.脉冲电流阴极保护技术[J].腐蚀科学与防护技术,2001,13(3):89—91.
QIU Yu-bing, GUO Zhi-hu, LIN Han-tong, et al. Pulse Current Cathodic Protection Technology[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2001,13(3):89—91.
- [41] 石仁委,刘璐.油气管道腐蚀与防护技术问答[M].北京:中国石化出版社,2011:158—161.
SHI Ren-wei, LIU Lu. Oil and Gas Pipeline Corrosion and Protection Technology Question and Answer[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011:158—161.
- [42] 郝宏娜,李自力.非均匀土壤中阴极保护电位数值模拟计算[J].化工机械,2012,39(2):494—496.
HAO Hong-na, LI Zi-li. Cathodic Protection Potential in Heterogeneous Soil Numerical Simulation[J]. Chemical Machinery, 2012,39(2):494—496.
- [43] 赵密锋,谢俊峰.复杂环境下套管阴极保护参数电化学测试确定研究[J].材料热处理技术,2012,41(22):120—124.
ZHAO Mi-feng, XIE Jun-feng. Electrochemical Testing Casing Cathodic Protection Parameters under Complicated Environment Research[J]. Journal of Material Heat Treatment Technology, 2012,41(22):120—124.
- [44] 黄颖军,楼森,芦玉峰,等.埋地环境下容器外腐蚀检测技术浅析[J].表面技术,2013,42(4):122—126.
HUANG Ying-jun, LOU Miao, LU Yu-feng, et al. Buried Environment Outside the Container Corrosion Detection Technology Makes Analysis[J]. Surface Technology, 2013, 42(4):122—126.
- [45] 王芙庆.油井套管腐蚀机理与防腐工艺[J].中国新技术新产品,2010,24(16):107—109.
WANG Fu-qing. Oil Well Casing Corrosion Mechanism and Anti-corrosion Technology[J]. China's New Technology and New Products, 2010,24(16):107—109.
- [46] 高山卜.埋地管道阴极保护电位的数值模拟[D].成都:西南石油大学,2012.
GAO Shan-bu. The Numerical Simulation of the Buried Pipeline Cathodic Protection Potential[D]. Chengdu:South-west Petroleum University, 2012.
- [47] 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. Numerical Simulation Technology in the Long-distance Pipeline Cathodic Protection Application Progress[J]. Journal of Corrosion and Protection, 2011,32(12):969—971.
- [48] 张丰,陈洪源,李国栋,等.数值模拟在管道和站场阴极保护中的应用[J].防腐防温,2011,30(3):208—212.
ZHANG Feng, CHEN Hong-yuan, LI Guo-dong, et al. Numerical Simulation in the Pipeline and Station, the Application of Cathodic Protection[J]. Journal of Corrosion Prevention, 2011,30(3):208—212.
- [49] 翁永基.阴极保护电位分布数学模型研究及其应用[J].腐蚀科学与防护技术,1999,11(2):99—111.
WENG Yong-ji. Research and Application of Mathematical Model of Cathodic Protection Potential Distribution[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1999,11(2):99—111.
- [50] 蔡培培.应用阴极保护电流密度评价阴极保护的有效性[J].管道技术与装备,2011(4):40—41.
CAI Pei-pei. Evaluate the Effectiveness of the Cathodic Protection Applied Cathodic Protection Current Density[J]. Journal of Pipeline Technology and Equipment, 2011(4):40—41.