

脉冲阴极保护研究现状及在铝合金防护上的应用展望

周冬, 李国明, 迟均瀚, 陈珊

(海军工程大学 化学与材料教研室, 武汉 430033)

摘要: 对脉冲阴极保护技术的起源, 发展历史及应用现状进行了介绍。根据学者对 Q235 钢、40 角钢等金属在模拟海水环境下进行的脉冲阴极保护研究, 确定了影响脉冲阴极保护效果的主要参数为脉冲周期、占空比、脉冲幅值以及阳极距离等, 分析得出了脉冲阴极保护技术的优点以及该技术推广所存在的限制和原因, 并与传统直流阴极保护技术的保护效果进行比较, 显示出脉冲阴极保护技术用于金属设备防护时的优越性, 可使保护电位更均匀, 保护距离更长, 在同等保护效果下的能耗更低。分析了当前海水环境下船用铝合金的使用特点以及保护现状。结合脉冲阴极保护的特长和优点, 根据传统的阴极保护理论以及双电层理论, 分析并展望了脉冲阴极保护技术用于海洋环境下船用铝合金防护的可行性和应用前景。

关键词: 脉冲电流; 阴极保护; 脉冲参数; 铝合金

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.06.013

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)06-0081-05

Research Status of Pulse Cathodic Protection and Its Application Prospects in Aluminum Alloy Protection

ZHOU Dong, LI Guo-ming, CHI Jun-han, CHEN Shan

(Department of Chemistry and Materials, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

ABSTRACT: This paper introduced the origin, development history and applications status of pulse cathodic protection technology. According to the research on pulse cathodic protection of Q235 steel and 40 angle steel in simulated seawater environment, it showed that the main parameters affecting pulse cathodic protection were pulse period, duty cycle, pulse amplitude and anode distance, etc. The advantages of pulse cathodic protection and the limitations and causes of the promotion of this technology were analyzed. Compared with the traditional DC cathodic protection technology, it showed the superiority of pulse cathodic protection technology for the protection of metal equipment structure, which can make the protection potential more uniform, make protection distance longer, and make energy consumption lower under the same protection effect. The characteristics and protection status of aluminum alloys in marine seawater environment were analyzed. Combined with the characteristics and advantages of pulse cathodic protection, according to the traditional cathodic protection theory and the electric double layer theory, the feasibility and application prospect of pulse cathodic protection technology for marine aluminum alloy protection in ma-

收稿日期: 2019-12-07; 修订日期: 2020-01-28

Received: 2019-12-07; Revised: 2020-01-28

作者简介: 周冬(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为船用金属材料及腐蚀与防护。

Biography: ZHOU Dong (1994—), Male, Master's degree, Research focus: marine metal materials, corrosion and protection.

通讯作者: 李国明(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料的腐蚀与防护。

Corresponding author: LI Guo-ming (1972—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: corrosion and protection of materials.

rine environment were prospected.

KEY WORDS: pulse current; cathodic protection; pulse parameter; aluminium alloy

阴极保护技术自提出以来,就在金属设备防护上广泛应用,而且取得了极好的效果。其主要原理是通过外部手段向被保护的金属结构提供阴极电流,使其阴极极化到一定程度,从而抑制被保护金属发生腐蚀而产生的电子迁移行为,降低腐蚀速率或者避免腐蚀的发生。牺牲阳极阴极保护是通过溶解自身来向被保护金属提供阴极电流,外加电流阴极保护则是通过直流电源设备向被保护金属提供电流^[1]。经过多年的发展,阴极保护作为一种非常成熟的腐蚀防护手段,已广泛应用于海水、淡水、土壤、化工介质中的管道、电缆、码头、船舶、桥梁等金属结构的保护^[2]。

1 脉冲阴极保护研究现状

对于石油工业中的油井套管防护来说,广泛使用的是传统的直流阴极保护技术^[3]。虽然这种技术已经发展得很成熟,但由于使用的是直流电流,传播距离有限,使得深井下的套管不能被有效地保护,且直流电流在套管上分布不均匀,会造成套管局部过保护,而局部却未达到保护标准,这是油井套管保护面临的最突出的问题。因此,若基于直流阴极保护技术想要取得更好的保护效果,必须加大电流强度,并且扩大阳极地床。这就导致耗能增大,成本大大增加。脉冲电流阴极保护技术的出现为油井套管的保护提供了新路径。研究表明,脉冲电流阴极保护具有更强的穿透性,可以较大范围地调节电流大小,使电流传播得更远,而且电流分布更均匀,所需电流更小,无需扩大阳极地床也可以有效地延长保护深度,耗能更小,能够对套管起到有效的保护作用^[4]。

脉冲电流阴极保护技术在1961年第一届国际金属腐蚀大会上由Heuzé B正式提出,并研究了脉冲阴极保护下带覆盖层管线上电位分布的变化^[5]。研究指出,脉冲阴极保护技术可以应用于油井套管外更广泛的领域,因此后来进行的研究也涉及到了埋地管线、换热器等^[6-7]。国外部分油田已采用脉冲阴极保护技术对油井套管进行保护,并已证实具有良好的保护效果^[8]。尽管如此,在保护设备上的设计往往是凭借经验,或者根据长输送管道理论而达到半理论半经验的水平。虽然研究证明脉冲阴极保护可以有效延长油井套管的保护深度,而且使保护电位分布更均匀,但各个深度处的保护电位究竟如何分布,保护深度到底能达到多大,这些往往是不够清楚的。国内对脉冲阴极保护也缺乏全面细致的机理研究,加上现场应用的实例较少,且该技术的实施需要特制的脉冲电源^[9-10],因此阻碍了脉冲阴极保护技术的发展与推广。由于需要复杂的电子器件,最早的商用脉冲整

流源价格昂贵,但电子设备的价格一直在下降,所以脉冲整流源的价格已经变得非常有竞争力。目前阴极保护的脉冲电源可以稳定地安全运行在工业和野外环境,同时输出稳定的脉冲波形^[11]。

脉冲电流阴极保护技术发展六十几年至今,国内仅有邱于兵等致力于脉冲阴极保护的机理研究。研究表明,方波脉冲之所以能实现阴极保护,其本质在于阴极界面双电层电容在方波电流作用下的能量积累。在对方波脉冲的模拟研究中,阴极表面的电位分布远比直流作用时均匀^[12-14]。

D. A. Diakow等^[15]采用两套相同的模拟缝隙腐蚀装置,对比研究了直流阴极保护和脉冲阴极保护的作用效果。该研究较为全面地考虑了试验周期、能量消耗、脉冲波形、频率、幅值、占空比等因素的影响。结果表明,当采用锯齿波形的脉冲时,缝隙中的电位分布与直流作用时没有明显的差别。采用电容放电产生的脉冲作用时,缝隙中的保护距离与直流相比有大幅度的延长。在同等保护效果下,脉冲阴极保护系统比传统直流保护的电流消耗要小。研究还表明,最有效的脉冲波形应该具有相对短的脉冲宽度、低的频率和较大的电压幅值。

邱于兵等^[10]对Q235钢在直流和方波脉冲阴极保护状态下的保护效果进行了对比研究。其中,直流阴极保护实验是控制电极电位为某一阴极极化电位,如 -0.77 V (vs. SCE) ,脉冲阴极保护实验则是调整脉冲电流幅值,控制阴极电位响应波形的最下沿电位值在同一阴极极化电位。脉冲频率为 600 Hz ,占空比为20%。结果表明,在 -0.77 V (vs. SCE) 极化电位下,脉冲阴极保护的防护度与直流阴极保护相当,均达到90%以上,证明在脉冲电流的作用下,可以实现与传统阴极保护相当的保护效果。在防护度相当时,脉冲阴极保护比传统直流阴极保护有更小的平均电流消耗和更高的保护效率。

张涛等^[16]在NaCl溶液体系里建立均质模拟油井套管体系,采用挂片法研究了方波脉冲电流参数频率、占空比以及阳极距离等因素对40角钢方波脉冲电流阴极保护的影响。研究表明,随着方波脉冲频率的增加,阴极极化电位分布曲线逐渐发生负移,极化幅度逐渐增加,对模拟油井套管的有效保护深度明显延长,而且所需的平均保护电流更小。要提高保护效果和降低电流消耗,应选择中间范围的占空比,较高的频率和适当的阴阳极距离。

以上对脉冲阴极保护的研究均很好地表明了其具备传统直流阴极保护所不具备的优点,且提出影响脉冲阴极保护技术的主要参数为脉冲波形、频率、占

空比、幅值以及阳极距离^[17]等,对这些参数的优化设计可以最大限度地发挥脉冲阴极保护的效果。

2 船用铝合金阴极保护现状

虽然近年来有部分学者对脉冲电流阴极保护技术进行了研究,但研究对象基本上都是各种类型的钢^[18-20],没有发现关于其他种类金属设备脉冲阴极保护的研究。基于脉冲电流阴极保护的保护距离长、保护电位均匀的特点,结合当前海水环境下铝合金的保护现状,可尝试将脉冲电流阴极保护技术应用于铝合金船舶的防护上。

铝合金作为一种轻金属,早在 1892 年就应用于船舶上^[21]。铝合金船舶具有船体质量轻、航速快以及良好的耐腐蚀性等特点,可减少能耗,降低维修成本。铝的耐腐蚀性主要取决于表面的钝化膜。相比于钢质船,铝合金船不需要进行定期消磁,能保证所有仪器的正常工作^[22]。由于铝合金船舶使用的环境多为海水环境,海水中的 Cl^- 对铝合金的侵蚀性非常大,很容易发生点蚀、缝隙腐蚀等问题,严重的甚至造成穿孔^[23]。因此,在现有防护技术的基础上,寻求更有效的保护方式显得尤为重要。

铝合金易钝化,在空气中会生成一层很薄的自然氧化膜^[24],厚度约为 $0.005\sim 0.015\ \mu\text{m}$ 。这层膜的耐蚀性并不好,因此常用化学转化和阳极氧化技术^[25-27]对铝合金表面进行处理,增加氧化膜的厚度和致密度,以提高其耐蚀性。目前,铝合金船舶多采用涂层并结合外加直流阴极保护技术进行防护,如果铝合金表面存在保护膜或者涂层,阴极保护可能会破坏这层膜或涂层,导致腐蚀加重。

铝作为一种两性金属,保护电位过正,会引起局部钝化膜的破裂;保护电位过负,会发生强烈的析氢反应,导致界面附近的 pH 显著升高,腐蚀加剧^[28]。目前,我国还没有将铝合金的阴极保护上升到标准。以某型船舶使用的 5083 铝合金来说,阴极保护范围较为模糊,从 $-800\sim -1300\ \text{mV}$ 都有学者进行验证。刘在建等^[29]结合循环伏安和形貌分析得出 5083 铝合金合适的保护电位在 $-800\sim -1000\ \text{mV}$ 之间,而王伟伟等^[30]得出的结论为 $-880\sim -1130\ \text{mV}$ 。该研究还发现,随着阴极保护时间的延长,在静置水域中铝合金界面附近很容易碱化。国外研究提出的标准一般比国内的要负,文献^[31]中提到德国规定铝在氯化钠溶液中的保护电位为 $-830\sim -1030\ \text{mV}$,英国标准规定铝在海水中的保护电位为 $-920\sim -1170\ \text{mV}$ 。可见在不同的环境下,铝合金保护电位不一样,且都没有固定的标准。

目前,国内铝合金船舶的保护电位都比较高,达到 $-1200\ \text{mV}$ 甚至以下,在如此负的保护电位下铝合金的碱腐蚀是个比较大的隐患。

3 脉冲阴极保护在铝合金防护上的展望

在传统的直流阴极保护中,铝合金船舶处于动态变化的海水环境中,想要控制铝合金的保护电位完全处于保护区间内使得其被有效保护是比较困难的,因此容易出现严重的局部腐蚀问题,导致隐患的发生^[31]。铝合金船舶由于结构设备的不规则性,保护电位在各个区域的分布是不均匀的。以往对油井套管和脱粘覆盖层系统的研究表明,脉冲电流阴极保护可以使保护电位分布得更均匀,正好弥补了铝合金阴极保护的这一缺陷^[32]。

H. J. Kipps 等^[33]曾申请了关于脉冲阴极保护系统的美国专利。专利中提到脉冲宽度、脉冲频率和电压幅值是脉冲阴极保护的三个重要参数。若将脉冲宽度控制在 $7\sim 60\ \mu\text{s}$,可使希望发生的反应有足够的时间完成,而不希望发生的反应则没有足够的反应时间,且脉冲频率应为体系的共振频率。结合双电层理论,不难理解:对于海水环境下的铝合金防护来说,若脉冲参数设定得合理,在理论上可以在脉冲周期内仅对金属表面的双电层进行充放电,这样金属基体就不会发生电极反应,或者只有很少一部分参加电极反应,从而达到保护基体的效果。

脉冲阴极保护技术具有使保护电位均匀分布的特点。尽管保护机理尚未完全清楚,但应用实例表明,该技术具备传统阴极保护所不具有的优点,因此初期的研究探索也是值得进行的。对于铝合金这种易钝化的两性金属来说,局部保护电位过高或过低都无法形成有效的防护。根据铝合金传统直流阴极保护的电位特性,选择最典型的方波脉冲,合适的脉冲参数——脉冲宽度和脉冲周期,可将船用铝合金的防护效果进一步提升。

4 结语

阴极保护技术是公认的最有效的金属防护手段,而脉冲电流阴极保护采用高频间歇式供电的方法,将阴极保护技术的防护效果进一步提升,且能够达到传统直流阴极保护所不能实现的保护距离长、保护电位分布均匀以及总电流需求更低等优点,实地使用的优越性也已经被证实。由于对保护机理以及客观影响因素缺乏深入研究,目前国外仅有少部分油田实地使用这种技术,但其表现出的优越性表明应用前景是非常可观的。

脉冲阴极保护大多用于钢质材料的保护。铝合金作为可钝化的两性金属,耐蚀性较好,但在海洋环境中使用也不容乐观。脉冲式阴极保护为船舶铝合金的保护提供了一种新的思路与方法,即合理选择脉冲参数来控制金属表面双电层的充放电,从而有效抑制腐

蚀。目前来看,是解决船体保护不均的可行性方法。因此,对铝合金进行脉冲阴极保护的研究很有必要。

参考文献:

- [1] 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. Present Status and Prospect of Cathodic Protection for Pipeline[J]. Corrosion & Protection, 2004, 25(3): 93-101.
- [2] 邢少华, 李焰, 马力, 等. 深海工程装备阴极保护技术进展[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 49-53.
XING Shao-hua, LI Yan, MA Li, et al. Research Progress in Cathodic Protection Technology for Marine Infrastructures in Deep Sea Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 49-53.
- [3] 薛致远, 毕武喜, 陈振华, 等. 油气管道阴极保护技术现状与展望[J]. 油气储运, 2014, 33(9): 938-944.
XUE Zhi-yuan, BI Wu-xi, CHEN Zhen-hua, et al. Situation and Outlook for Cathodic Protection Technology of Oil & Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(9): 938-944.
- [4] 杨娥, 李荣, 黄金侠, 等. 油井套管腐蚀机理与防腐工艺研究[J]. 中国石油石化, 2017(3): 59-60.
YANG E, LI Rong, HUANG Jin-xia, et al. Study on Corrosion Mechanism and Anticorrosion Technology of Oil Well Casing[J]. China Petrochem, 2017(3): 59-60.
- [5] METWALLY I A, AL-BADI A. Factors Affecting Pulsed—Cathodic Protection Effectiveness for Deep Well Casings[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2009, 56(4): 196-205.
- [6] HEUZÉ B. A New Technique of Cathodic Protection Based on Adjustment of Quantity of Electricity to the Potential[C]// 1st International Congress of Metallic Corrosion. London, 1961.
- [7] GAN F, SUN Z W, SABDE G, et al. Cathodic Protection to Mitigate External Corrosion of Underground Steel Pipe Beneath Disbonded Coating[J]. Corrosion, 1994, 50(10): 804-816.
- [8] JUCHNIEWICZ R. Performance Tests of Pulse Cathodic Protection Installation for a Heat Exchanger[J]. Ochrona Przed Korozja, 1987, 30(5): 101-104.
- [9] NGUYEN N B, JERRY B. Pulsed Current Cathodic Protection of Well Casing[J]. Materials Performance, 1995, 34(4): 17-21.
- [10] 袁森, 周好斌, 徐伟东. 智能化油井套管阴极保护脉冲电源系统设计[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2015, 32(1): 8-13.
YUAN Sen, ZHOU Hao-bin, XU Wei-dong. Design of Intelligent Power Supply System with Pulse Current for Cathodic Protection of Oil Well Casing[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2015, 32(1): 8-13.
- [11] 曹亮. 新型阴极保护脉冲电源的设计[J]. 石油化工自动化, 2011, 47(3): 17-19.
CAO Liang. The Design of New Type Cathodic Protection Impulse[J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2011, 47(3): 17-19.
- [12] 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.
- [13] 邱于兵, 朱鸿赫, 余成平, 等. 方波脉冲电流阴极保护效果的实验研究[J]. 腐蚀与防护, 2004, 25(12): 520-522.
QIU Yu-bing, ZHU Hong-he, YU Cheng-ping, et al. Effect of Square Wave Pulsed Current On Cathodic Protection[J]. Corrosion and Protection, 2004, 25(12): 520-522.
- [14] 邱于兵, 郭稚弧, 林汉同. 方波脉冲电流阴极保护机理研究 I: 阴极电位波形特征[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(5): 40-44.
QIU Yu-bing, GUO Zhi-hu, LIN Han-tong, et al. Mechanism of the Cathodic Protection by Square Wave Pulsed Currents I: Characteristics of the Cathodic Potential Waveforms[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion And Protection, 2002, 22(5): 40-44.
- [15] DIAKOW D, VAN BOVEN G, WILMOTT M. Polarization under Disbonded Coatings: Conventional and Pulsed Cathodic Protection Compared[J]. Materials Performance, 1998, 37(5): 17-23.
- [16] 张涛, 周好斌, 许庆. 脉冲电流阴极保护参数的影响规律[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(1): 62-64.
ZHANG Tao, ZHOU Hao-bin, XU Qing. Influence Law of Pulse Current Cathodic Protection Parameters[J]. Corrosion and Protection, 2017, 38(1): 62-64.
- [17] 周好斌, 张涛, 许庆. 阳极距离对脉冲电流阴极保护深度的影响[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(10): 71-73.
ZHOU Hao-bin, ZHANG Tao, XU Qing. The Influence of Anode Distance on the Depth of Pulse Current Cathodic Protection[J]. Total Corrosion Control, 2015, 29(10): 71-73.
- [18] 许庆, 周好斌, 张涛. 油井套管脉冲电流阴极保护电源控制系统研究[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 87-90.
XU Qing, ZHOU Hao-bin, ZHANG Tao. Intelligent Pulse Current Cathodic Protection Power Supply Control System for Oil Well Casing[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 87-90.
- [19] ELBELBOL S. Cathodic Protection of Steel in Concrete[J]. Health Estate, 2002, 56(10): 34-36.
- [20] KOLEVA D A, GUO Z, VAN BREUGEL K, et al. Conventional and Pulse Cathodic Protection of Reinforced Concrete: Electrochemical Behavior of the Steel Reinforcement after Corrosion and Protection[J]. Materials & Corrosion, 2015, 60(5): 344-354.
- [21] 侯健, 张彭辉, 郭为民. 船用铝合金在海洋环境中的腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 59-63.
HOU Jian, ZHANG Peng-hui, GUO Wei-min. Study on

- Corrosion of Aluminum Alloys for Ship Applications in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 59-63.
- [22] 刘希燕, 蒋健明, 陈正涛, 等. 铝合金防腐保护研究进展[J]. 现代涂料与涂装, 2007, 10(12): 11-14.
LIU Xi-yan, JIANG Jian-ming, CHEN Zheng-tao, et al. Research Progress in Anti-Corrosive Protection for Aluminum Alloy[J]. Modern Paint & Finishing, 2007, 10(12): 11-14.
- [23] 杨铁军, 李国明, 陈珊, 等. 船用铝合金点蚀及阴极保护研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(2): 88-91.
YANG Tie-jun, LI Guo-ming, CHEN Shan, et al. Study of Hull Aluminum Alloy Pitting and Its Protection Potential[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(2): 88-91.
- [24] 杨丁, 黄芸珠, 杨岷. 铝合金表面处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
YANG Ding, HUANG Yun-zhu, YANG Jue. Surface Treatment Technology of Aluminum Alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [25] 吴敏, 孙勇. 铝及其合金表面处理的研究现状[J]. 表面技术, 2003, 32(3): 13-15.
WU Min, SUN Yong. Development of Surface Treatment for Aluminum and its Alloys[J]. Surface Technology, 2003, 32(3): 13-15.
- [26] 朱祖芳. 铝合金阳极氧化与表面处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
ZHU Zu-fang. Anodizing and Surface Treatment of Aluminum Alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [27] 方志刚, 韩冰. 铝合金舰艇腐蚀控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
FANG Zhi-gang, HAN Bing. Corrosion Control Technology of Aluminum Alloy Ship[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [28] 张文成. 铝及其合金表面处理与导电防护技术[J]. 电子工艺技术, 2005, 26(6): 50-52.
ZHANG Wen-cheng. Discussion on the Surface Treatment and the Conduction Protecting Technique for the Surface of the Aluminum and Its Alloy[J]. Electronics Process Technology, 2005, 26(6): 50-52.
- [29] 刘在健, 王佳, 张彭辉, 等. 5083 铝合金在海水中的腐蚀行为及其阴极保护研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(3): 239-244.
LIU Zai-jian, WANG Jia, ZHANG Peng-hui, et al. Corrosion Behavior of 5083 Al-alloy in Seawater and Its Cathodic Protection[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015, 35(3): 239-244.
- [30] 王伟伟, 孙腾, 侯健. 5083 铝合金在模拟淡海水中的电化学行为研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 10-12.
WANG Wei-wei, SUN Teng, HOU Jian. Study on Electrochemical Corrosion Behavior of 5083 Aluminum Alloy in Simulating Diluted Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 10-12.
- [31] 胡士信. 阴极保护工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
HU Shi-xin. Cathodic Protection Engineering Manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [32] 王曰义. 铝合金在流动海水中的腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 72-76.
WANG Yue-yi. Corrosion Behavior of Aluminum Alloy in Flowing Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 72-76.
- [33] KIPPS H J, BEACH S L, DONIGUIAN T M, et al. Cathodic Protection System: US, 3692650[P]. 1971-08-24.