

海洋平台阴极保护与监测技术的应用

邵静^{1,3}, 刘福国², 王秀通³, 阳利军², 赵晓栋⁴,
黄志强², 韩延波², 张兆德¹

(1.浙江海洋大学 船舶与机电工程学院, 浙江 舟山 316022; 2.海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451; 3.中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 4.烟台大学, 山东 烟台 264005)

摘要: 针对海洋平台全浸区的腐蚀情况, 着重介绍了阴极保护及其原理、种类及特点, 监测系统的组成及设计, 探讨阴极保护及监测系统对海洋平台水下防腐的应用意义。

关键词: 海洋平台; 阴极保护; 监测系统

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.03.005

中图分类号: TJ07; TG174

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)03-0024-05

Application of Cathodic Protection and Monitoring Technology on Offshore Platform

SHAO Jing^{1,3}, LIU Fu-guo², WANG Xiu-tong³, YANG Li-jun², ZHAO Xiao-dong⁴,
HUANG Zhi-qiang², HAN Yan-bo², ZHANG Zhao-de¹

(1.School of Naval Architecture and Mechanical-Electrical Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2.Offshore Oil Engineering Co., Ltd, Tianjin 300451, China; 3.Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4.Yantai University, Yantai 264005, China)

ABSTRACT: This paper focuses on corrosion of the fully immersed zone of the offshore platform, introduces the principles, types and characteristics of cathodic protection as well as composition and design of monitoring system, and discusses the application significance of cathodic protection and monitoring system to underwater anti-corrosion of offshore platform.

KEY WORDS: offshore platform; cathodic protection; monitoring system

21 世纪以来, 海洋再次成为世界关注的焦点, 我国也提出了“海洋强国”的口号, 海洋战略地位空前提高。由于地跨温带、亚热带和热带三个气候, 我国有着丰富的海洋生物资源, 种类有 2 万多种。我国的海洋矿产资源十分丰富, 钛铁矿、金红石、石英砂等都具有工业开采价值, 近海还蕴藏着大量的石油和天然气。除此之外, 我国拥有 299.7 万平方公里的海洋国土面积, 可以充分利用这些空间作为军事基地、生产场所、储藏场所等。如此多明显的海洋资源优势, 使得海洋开发规模不断扩大。海洋是一个腐蚀性很强、

很复杂的环境, 据调查显示^[1], 2014 年我国的腐蚀损失约占当年 GDP 的 3.34%。海水作为一种天然电解质, 阻值很小, 内含有多种氯化物和卤族元素。当金属接触时, 氯离子等与金属离子发生反应, 从而对金属结构造成破坏。同时, 由于水下微生物的附着、侵蚀以及海洋环境载荷(波浪力、风载荷、水压力、水流量、冰载荷等)的往复冲击, 海洋环境中的结构往往面临着点蚀、应力腐蚀、疲劳腐蚀等各种腐蚀问题。因此, 需要加强对海洋工程中材料有效的腐蚀防护方法, 延长海洋基础设施使用寿命。阴极保护及监测是目前较

收稿日期: 2017-11-03; 修订日期: 2017-11-30

作者简介: 邵静(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋工程与腐蚀防护研究。

通讯作者: 张兆德(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋工程研究。

成熟、应用较广的防腐技术，起到了良好的防护监测目的，确保了水下钢结构的正常工作。文中将着重对海洋平台的阴极保护与监测方法展开系统的介绍。

1 海洋平台的腐蚀现状及防护

海洋平台是目前需求较多的海上构筑物，多用于石油开采、运输等工作，其基本的钢结构长期处于潮湿的、较高盐雾的海洋环境中，同时承受巨大的波浪力和风力，因此很容易发生结构破坏，受到严重的腐蚀侵害，从而影响海洋平台的正常作业。以不同腐蚀特点来对海洋平台的腐蚀区带进行划分，主要有大气区、浪溅区、全浸区和海底泥土区。

大气是海洋平台接触最多的环境介质，海洋平台一般都会高于海面，减轻波浪流对平台自身的冲击。很多研究表明^[2-4]，海洋环境下的大气中含有较高浓度的氯离子，裸露的金属很容易发生腐蚀。常见的防护手段是涂覆防腐涂层，用来提高材料的耐盐雾性等。浪溅区由于干湿交替，且供氧充足，是海洋平台腐蚀最严重的区域^[5]。平台桩腿以及导管部分在浪溅区的腐蚀速率一般远高于全浸区，一般使用涂料、镀层、包覆等防护手段^[6]。中科院海洋环境腐蚀与防护重点实验室已成功研发矿脂包覆防护技术，用以解决浪花飞溅区的腐蚀问题^[7]。海洋平台在全浸区受到的腐蚀侵害主要来自于海洋生物、盐浓度、水流作用等，工程上一般采用阴极保护提高其耐腐蚀性，从而延长使用寿命。埋在海底泥土区的钢结构腐蚀情况较轻，因为泥土中溶解氧较少、各方向作用力较稳定。由于泥土中存在大量厌氧菌，如硫酸盐还原菌，会引发微生物腐蚀^[8-9]，该区带也可用阴极保护来实现防护目的。

2 阴极保护法

阴极保护法是最常用的电化学腐蚀防护手段。当金属接触到电解质后，会使金属不同的部位带有不同的电极电位，从而形成腐蚀电池。阴极保护就是通过加入一个驱动能，迫使电流一致流向被保护的结构表面，电子数大幅增加，使其处于阴极极化状态，抑制了阴极区材料表面电子的释放。阴极保护法成立的条件包括：存在充当阳极的部分、相对的阴极部分以及这两部分由导线连通，并且所处环境可导电。阴极保护法一般分为牺牲阳极阴极保护和外加电流阴极保护。

2.1 牺牲阳极阴极保护

1824 年，英国学者 Davy 提议用锌块来保护船舶，取得不错的效果后，这种方法逐渐延伸到保护港湾设施、管道工程、化工机械设备上，这就是最开始的牺牲阳极^[10]。牺牲阳极阴极保护法原理是引入一种还原性较强的金属作为阳极，通过导线将该金属与需要保

护的惰性金属连接，当处于同一电解质中时，电流流向被保护的金属端，而阳极的金属随着发生氧化还原反应而逐渐消耗。我国对钢结构的保护使用的牺牲阳极金属一般为锌、铝、镁、铁，由于海水电阻率较小、阳极溶解不均匀等原因，往往会选择锌或者铝，且单一金属材料往往不能很好地达到阴极保护的目，故专家们逐渐将发展方向转为多金属元素的掺杂。下面主要介绍几种具有代表性的牺牲阳极材料。

1) 锌牺牲阳极。锌牺牲阳极既可用于土壤环境中，也适用于电阻率小于 $15 \Omega \cdot m$ 的海水环境中，在海水中的电流效率高达 95%，可分为高纯锌和锌合金两种。无论是高纯锌还是锌合金，除了含有大量的 Zn 外，都存在着少量的 Al, Cd, Fe, Pb, Cu 等元素。这些微量元素对锌牺牲阳极的阴极保护法都有着一定程度的影响。例如 0.05% Cd 的加入有利于改善电化学性能，且不会引起晶间腐蚀；Al 的加入可以使阳极溶解得更加均匀^[11]。曾经有学者提出锌块中含有的微量镉会污染海水，并通过食物链的富集作用危害人体健康^[12]。锌牺牲阳极在海洋平台中的应用存在限制性主要是因为其较低的电容量，在全浸区的电容量约为 $780 \text{ A} \cdot \text{h}/\text{kg}$ ，在海底泥土区的电容量约为 $580 \sim 750 \text{ A} \cdot \text{h}/\text{kg}$ ，较小的电荷储藏量直接反映了锌牺牲阳极在使用时只能输出较小的电流^[13]。从经济和性能的角度考虑，锌合金阳极优于高纯锌阳极。因此，在应用工程中锌合金已逐渐取代了高纯锌。

2) 铝牺牲阳极。铝牺牲阳极因具有比锌阳极更负的开路电位和更大的电容量而被广泛应用于海洋工程中。铝阳极不仅发电量大，约为锌电极的 3 倍，同时具有良好的电化学性能，且溶解时均匀稳定。铝牺牲阳极材料起初是由两种元素构成的，早在 1955 年已有学者制备出 Al-Zn 二元合金并探究其作为牺牲阳极的阴极保护效果，不久又出现了 Al-Zn, Al-In，然而它们的电流效率都不高，并不能满足实际需求。同时，由于 Al 是一种易钝化金属，容易在表面形成一层致密的氧化膜，甚至是形成一层电阻较高的“保护壳”，阻碍其发生溶解。种种原因促使专家在铝牺牲阳极的研究中添加 Ag, In, Cd, Sn 等元素，通过加入一种或几种金属可使铝基的电位负移或改变钝化膜的性质使其易于脱落，达到更好的阴极保护效果。目前铝牺牲阳极在海洋工程中的应用技术已经较成熟。其中三元铝合金阳极研究最多的有 Al-Zn-In, Al-Zn-Ag, Al-Zn-Sn, Al-Fe-Si 等。三元铝合金阳极仍然存在着电流效率不高、阳极极化不理想等问题，故学者们又在该基础上继续加入了更多的金属元素。考虑到环境和生产问题，Cd, Hg, Ag 等逐渐受到限制，多元铝合金阳极主要是在 Al-Zn-In 的基础上再添加其他元素，使其电流效率达到 90% 以上，并具有良好的溶解性能。翟秀静^[14]等人通过实验发现 Al-Zn-In

系列的多元牺牲阳极的开路电位均低于 -1000 mV ，达到阴极保护效果，同时阳极表面腐蚀均匀，腐蚀产物易脱落不会对进一步阳极溶解造成阻碍。朱承飞^[15]等人借用金相显微镜和能谱分析得出了在 Al-Zn-In 的基础上同时添加 Sn 和 Sb，提高了阳极的电流效率，实现了改进铝牺牲阳极性能的结论。

3) 复合阳极。自从提出了“复合阳极”的概念，因其具有高电流效率、高活性、高容量而受到广泛关注和研究。复合阳极是在传统具有高驱动电压的锌、铝等阳极的基础上，利用高温融化炼制或者采用喷涂手段等将其与具有高效率的阳极制作成新的复合阳极体系，一般用于无涂层保护的钢结构。以镁铝复合阳极、镁锌复合阳极和双层铝复合阳极为例，内部的 Al、Zn 作为主要牺牲材料在 Mg 这一辅助材料中保持较高的活性，并可持续提供稳定性较高的电流，延长了其本身的使用寿命，达到最终低成本、效果好的目的。刘欣^[16]等人对用熔融浇铸法制备的镁铝复合阳极进行实海测试，测得阴极保护电位稳定在 $-1\sim-0.95\text{ V}$ ，符合工程要求。赵锐^[17]将自制的双层铝复合阳极进行电化学性能测试和实海模拟试验，发现电位可降至 -1.2 V 以上，阴极保护效果较好尤其是极化性能较优异。目前对于浪溅区的腐蚀防护多是采取重防腐涂料、金属热喷涂、热浸镀层、包覆层保护等手段，复合阳极阴极保护在浪溅区的工程应用仍需进行许多工作。

牺牲阳极阴极保护具有许多优点，它不需要外部电源，实施简单易行，且后期的管理维护工作较少。使用这种方法的保护电流可以分布均匀，不会出现过保护的情况。但安装成本较高，驱动电压有限，增加海洋平台的负载，也是牺牲阳极不可忽略的缺点。

2.2 外加电流阴极保护

对导管架等一些需要大型保护的海洋平台而言，若采用牺牲阳极，则对阳极需求量很大，从而将导致平台负重过多，存在安全隐患。对于处在深水区的钢结构，牺牲阳极的安装费用和修复费用将会远大于材料自身的损失成本。相比较牺牲阳极，外加电流阴极保护输出的电流量大、可调控、安装方便，不会增加平台的负载，且不会产生重金属污染事故，所以近年来对于导管架等平台的外加电流阴极保护开始得到应用^[18-19]。外加电流阴极保护是一种适合中等水域和深水域的环境友好型阴极保护法。目前我国在这方面的研究还未系统化，关键技术也不够成熟，因此开发一套安全可靠、效果明显的外加电流系统显得尤为重要。

2.2.1 原理与组成

外加电流法是通过直接强制加入一个外部电源来改变周围环境的电位，使电子聚集到需保护的设备上，并调控电子传输速度和密度，让平台在整个大环

境中处于低电位状态，成为相对的阴极，发生阴极极化，从而得到保护。外加电流阴极保护系统一般由电源、辅助阳极、参比电极和连接电缆组成。当电路接通后，电流通过海中的阳极经过电缆流至平台的钢结构上，形成闭合回路，从而可使平台避免或减缓腐蚀侵害。此外，为使辅助阳极输出的保护电流更加均匀稳定，避免对附近钢结构产生过保护，有时需在阳极周围涂刷阳极屏蔽层。

2.2.2 国外技术现状

我国目前的外加电流阴极保护技术虽较成熟，但与国外相比仍存在差距。国外较成功的外加电流阴极保护系统包括抗拉伸阳极系统和远地阳极系统。抗拉伸阳极是由一个或若干个辅助阳极固定在一根绳索上，该绳索可提供足够的支撑力，绳索下端栓上负载用以固定，并将整个抗拉伸阳极都固定在外套管上。抗拉伸阳极一般可根据支撑部分和供电部分是否分离分为两种设计方案，一种是绳索即电缆，供电支撑一体化，一种是绳索提供支撑作用，电缆提供供电作用。绳索上辅助阳极的个数及间距应充分考虑实际需求电流的大小，且对绳索本身的强度、韧性有较高的要求。远地阳极的原理是将阳极放置于海底泥土区或者是海底的底座上，距离被保护的钢结构依照该钢结构的大小而定，通常是在几米到 300 m 之间。远地阳极也有两种设计方案，一种是将辅助阳极安装在混凝土底座或者钢结构基座上^[20]，该设计方案可以提供足够满足需求的电流密度；还有一种是将辅助阳极设计为浮式结构安装在设计好的特定支架上^[21]，这种方案则可以使阳极避免海沙和海泥的冲刷破坏。

2.2.3 国内技术发展及现状

20世纪60年代，我国就发现用于海洋结构物中的低合金钢在海水这一腐蚀性强的环境中很容易会发生点蚀等局部腐蚀状况，即使存在涂层保护，也会有穿孔现象。于1964年首次在船舶上使用了外加电流防腐技术，整个系统中包括有硒整流器作为电源，铸铁（内含有较高含量的硅）作为辅助阳极，高纯锌作为参比电极。1969年，我国研究人员又尝试将外加电流保护系统应用在核潜艇外。不久后，研制出了 Ag/AgCl 参比电极并在舰上进行试验，经过多年的改善，我国当时所有的驱逐舰都使用了这套外加电流系统进行腐蚀防护。1975年前后，研发人员已经将可控硅恒电位仪代替硒整流器，镀铂钛电极代替铸铁，参比电极使用 Ag/AgCl 和 Zn 的复合电极。我国现行的《船体外加电流阴极保护系统》标准已从2000年沿用至今，这是我国进一步详细、系统地对外加电流技术应用规范的说明。

虽然国内外外加电流技术研究起步较晚，但是得益于电子信息技术、计算机技术的不断进步，外加电流

在海洋环境中的应用越多越广，我国研究人员通过不同方法做了大量外加电流技术的优化设计工作。如 2014 年刘福国^[22]等人通过渤海湾 JZ120-1 导管架的缩比模型来研究辅助阳极的电流单位和距离平台的相对位置，从而达到防腐蚀目的。2016 年李民强^[23]等人使用 BEASY 数值模拟软件分析外加电流通电点为系统设计提供指导，实现对阳极数量和位置的优化。我国的外加电流阴极保护技术在近海的导管架平台做了试验验证，使用寿命仍不够理想，原因可归纳为以下几点：发电和整流设备庞大，然而控制精度没有达到要求；参比电极在海水中易受到微生物损坏和其他化学损坏；操作人员使用不当或者维护能力不足；浅海域一般使用牺牲阳极，对外加电流技术不够重视。近年来，对自升式钻井平台和张力腿平台的外加电流阴极保护技术已经开始应用，并达到了良好的腐蚀防护效果^[24]，为进一步提高阴极保护技术提供了强有力的技术支持。

3 阴极保护监测系统

随着阴极保护技术被海洋平台作为腐蚀防护手段广为应用，阴极保护监测系统应运而生，它作为监测被保护构筑物的阴极保护状态的主要手段，可以实时了解钢结构的腐蚀状态，随时提供水下钢结构阴极保护系统运行状况信息，及时发现问题或隐患。系统对于确保结构的长期安全营运，具有重要价值。阴极保护监测系统主要是针对降低腐蚀成本、早发现腐蚀问题、避免出现灾难性事故设计的。

3.1 原理及概述

阴极保护监测系统是由电化学信号传感器、信号处理器和微机组成的监测系统，它能自动的对数据实时采集，循环地对阴极保护系统的主要参数进行测量、显示，并能自行储存结果，工作人员可直接打印信息以分析阴极保护系统的运行状况。其原理是通过测量被保护钢结构（阴极）的电位，分析判断此钢结构是否达到腐蚀电位，进而供工作人员对阴极保护的效果作出评价并采取保护措施。1999 年王庆璋、常炜^[25]等人首次发表了微机化阴极保护原位监测系统的文章，该监测系统主要由数据采集存储器、数据传输系统和探头群组成。随后，中科院海洋所等单位也对阴极保护监测的相关技术进行了报道和研究，主要涉及了部分设备的优化以及应用问题^[26-27]。监测系统的设计需秉承着数据真实全面、系统安全可靠、保证海洋平台在使用寿命期间正常工作的原则，还需能够抵抗海洋风力大、温度变化大等恶劣环境，数据采集器的自备电源可连续工作 120 天以上，具备防水和较强的抗震、抗干扰能力。

3.2 设备组成

阴极保护自动监测系统一般分为水上和水下两部分，水下部分包括安装在海工结构上的双电极电位测量系统、被监测阳极及其发生电流检测器、护管、连接法兰、防水电缆和走线盒；水上部分包括数据采集存储器及其密封箱与电源、阴极保护监测仪及其辅助设备。通常，在阴极保护中，判断钢结构是否达到完全保护，要借助参比电极测量金属的保护电位。为了对阳极的性能进行评价，也需要了解阳极的发生电流，所以用一些数据来表征保护状态，主要是保护电位、保护电流密度、阳极电流和阳极电压的测量，因而电位探头、电流探头和数据采集器是监测系统的核心设备。电位探头常用双电极电位探头，主要由 Ag/AgCl 参比电极和 Zn 参比电极组成。Ag/AgCl 海水电极的测量精度为 ± 5 mV，Zn 电极电位的测量精度为 ± 15 mV，电位监测范围为 $-0.4 \sim -1.4$ V^[28]。双电极电位探头可供长期使用，并具有抗震、抗冲击的特性，同时可以承受深海的高压环境。电流探头多是由于阳极输出电流的测量，此测量值会略小于实际输出的电流值，因为探头内部的电阻会引起少量的分流。电流探头同样需要具有抗震、耐压的性能。采集到的电位、电流等数据会通过信号传输电缆传输到微机数据采集系统，并存储在系统程序中，按照电位的格式进行显示。

3.3 监测记录与系统功能

监测系统的监测内容包括得到的实时被保护部位的电位和辅助阳极的发生电流，同时根据监测到的被保护部位的电位值和阳极的电流值，以时间为横坐标，处理得出电位和电流的变化曲线。监测系统的软件可在微软视窗操作系统下运行，全部采用 WINDOWS 图形汉字化界面，人机对话方式，操作简便。系统可对任一站各监测点的阴极保护电位连续检测，监测时间频率在 60~720 min 范围内，具体可由用户随意设定，也可以采用系统软件推荐的设定，当出现电位异常情况时，系统可及时给出报警。用户可自行根据实际需求对任一监测点、任一监测时间段内的阴极保护电位进行存储、查询和分析处理。监测系统对于任何监测点的任一时期内的时间-电位图、时间-电流图都会进行保存，并可供查询和打印。系统还能够显示在同一监测周期内，不同监测点的平均电位值，并统计相应的分布规律，绘制出对比图，用户可直观地进行分析并打印出全部数据。

3.4 性能指标

为了满足海洋工程实施所在海洋环境的需要，监测装置需要满足如下条件：能够适应恶劣的海洋环境，数据采集器可在 $-20 \sim 50$ °C 环境下正常工作；数

据采贮器的自备电源可连续工作 120 天以上；具备防水和较强的抗震、抗干扰能力；操作简便，性能可靠；数据采集通道的数量应能满足阴极保护监测系统的要求，每个通道的输入阻抗应大于 100 MΩ；电位测量范围应不小于 -1400 ~ 1400 mV，电位分辨率小于 5 mV；电流测量量程应不小于阳极设计发出电流的 10 倍，电流分辨率小于 0.2 A；数据采集速度应能满足阴极保护监测的要求；数据采贮器的数据存储量不少于 3000 组，并具有备份功能。所存储的数据可保存 2 年以上；阴极保护监测仪可以独立运行，或与数据采贮器联机运行。阴极保护监测仪的采样通道、输入阻抗、测量范围及精度与数据采贮器相同。显示内容应直观、清晰，可清楚地了解到阴极保护监测系统的现行状况、历史情况及设定情况，并可方便地查询有关数据、趋势图及牺牲阳极的剩余寿命。

与人工监测相比，监测系统尽可能避免了海洋环境中多重抗干扰因素，大大增强了工作的稳定性和结果的可靠性。采集的数据量大，能较为真实地反映平台的阴极保护效果，减小了偶然性。系统采用模块组装，提高了劳动效率和管理水平。

4 结语

随着海洋产业的持续发展，海洋平台的腐蚀问题将会得到越来越多的重视，需根据不同区带的特点来采取不同的腐蚀防护手段。阴极保护技术是国际上公认的具有较长发展历史的防腐蚀技术，其中牺牲阳极法适用在结构密集、被保护对象面积和需要保护电流小、没有电源的场合，外加电流保护对象规模大，所需要保护电流大的场合。监测系统是根据阴极保护技术的发展，并结合生产实际和市场需求研制开发的，能科学地评价海洋平台阴极保护效果，现已在海洋平台上得到广泛应用。阴极保护及其监测系统为海洋平台提供了有效的腐蚀防护，并提高了监测结果的准确性和高效率管理，发展前景仍十分广阔。

参考文献：

- [1] HOU B, LI X, MA X, et al. The Cost of Corrosion in China[J]. *Npj Materials Degradation*, 2017(1): 1-10.
- [2] 杨帆, 陈朝轶, 李玲, 等. Cl⁻浓度对 0359 铝合金在模拟海洋大气环境中腐蚀的影响[J]. *现代机械*, 2012(1): 79-81.
- [3] 程庆利. 电化学研究氯离子对铜和锌的大气腐蚀影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [4] 齐广政. 海洋大气环境下混凝土氯离子侵蚀性能的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- [5] 赵琪慧. 海上平台腐蚀环境分析与防腐配套涂料体系设计[J]. *上海涂料*, 2012, 50(2): 19-22.
- [6] 张巧霞, 许沫, 王秀通, 等. 重防腐涂料在海洋工程钢结构中的研究进展[J]. *装备环境工程*, 2015, 12(4): 60-65.
- [7] 侯保荣, 张盾, 王鹏. 海洋腐蚀防护的现状与未来[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(12): 1326-1331.
- [8] 孙成, 韩恩厚, 王旭. 海泥中硫酸盐还原菌对碳钢腐蚀行为的影响[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2003, 15(2): 104-106.
- [9] 段继周. 海水和海泥环境中厌氧细菌对海洋用钢微生物腐蚀行为的影响[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2003.
- [10] 陈丽君. 铁基牺牲阳极性能评价及其在海洋工程中的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [11] 龙萍, 杨世伟, 罗兆红. 微量元素对热海水环境下锌牺牲阳极性能的影响[J]. *应用科技*, 2003, 30(7): 1-4.
- [12] 孙嘉鼎. 船用牺牲阳极防护锌块对海水有污染[J]. *今日科技*, 1989(8): 33.
- [13] 许立坤, 马力, 邢少华, 等. 海洋工程阴极保护技术发展评述[J]. *中国材料进展*, 2014, 33(2): 106-113.
- [14] 翟秀静, 符岩, 郎晓珍, 等. 添加元素对铝基牺牲阳极的影响[J]. *有色金属工程*, 2006, 58(1): 42-45.
- [15] 朱承飞, 徐峰, 魏无际, 等. 微量铈和锡对铝基牺牲阳极材料性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(4): 631-636.
- [16] 刘欣, 侯保荣, 陈孟丽, 等. 镁铝复合牺牲阳极性能及其对跨海大桥钢结构阴极保护的可行性[J]. *公路交通科技*, 2010(s1): 31-36.
- [17] 赵锐. 铝铝复合牺牲阳极的电化学性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [18] 张脉松, 尹鹏飞, 马长江. 海洋平台外加电流阴极保护技术[J]. *全面腐蚀控制*, 2013(3): 20-23.
- [19] GURRAPP A I. Physical and Computer Modelling for Ship's Impressed-current Cathodic-protection Systems[J]. *Mathematical Models*, 1994(4): 15-19.
- [20] FFRENCHMULLEN T. An Impressed Current System for the Protection of Offshore Platform[J]. *Materials Performance*, 1980, 19: 21-26.
- [21] BRITTON J. Cathodic Protection Surveys of Offshore Platforms—A New Approach[J]. *Technical Paper*, 1998, 29: 31-36.
- [22] 刘福国, 张国庆, 张伟, 等. 基于缩比模型的导管架平台外加电流阴极保护系统优化设计[J]. *装备环境工程*, 2014, 10(5): 125-131.
- [23] 李民强, 郑震生, 董亮, 等. 海洋平台导管架外加电流阴极保护设计数值模拟[J]. *表面技术*, 2016, 45(7): 109-114.
- [24] 尹鹏飞, 张伟, 许征凯, 等. 导管架平台外加电流阴极保护技术[J]. *腐蚀与防护*, 2012(s2): 18-22.
- [25] 常炜, 栗艳侠, 徐桂华, 等. 海上平台阴极保护原位监测系统[J]. *中国海上油气: 工程*, 1999(3): 27-30.
- [26] 熊信勇, 许川壁, 姚植忠, 等. 海洋平台阴极保护监测系统的研制及应用[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(1): 70-75.
- [27] 宋积文, 陈胜利, 王秀通, 等. 新型海洋石油平台阴极保护初期数据检测仪的开发与应用[J]. *全面腐蚀控制*, 2015, 29(6): 83-86.
- [28] 陈胜利, 王秀通, 宋积文, 等. 基于海洋石油平台导管架的多通道腐蚀监测技术[J]. *全面腐蚀控制*, 2015(7): 27-29.