

海洋工程用新型牺牲阳极设计与性能研究(IV) ——导管架平台阴极保护应用研究

刘福国¹, 张伟^{2,3}, 王秀通⁴, 尹鹏飞^{2,3}, 黄志强¹, 张国庆¹, 韩冰^{2,3}, 李向阳⁵

(1.海洋石油工程股份有限公司 设计公司, 天津 300451; 2.青岛钢研纳克检测防护技术有限公司, 山东 青岛 266071; 3.钢铁研究总院 青岛海洋腐蚀研究所, 山东 青岛 266071; 4.中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 5.中国钢研科技集团有限公司 钢铁研究总院, 北京 100081)

摘要: **目的** 通过构型优化设计了一种新型牺牲阳极, 使其在与常规阳极质量相当的前提下, 增加初期发生电流, 使被保护体较快极化到保护电位, 后期发生电流降低, 满足平均和末期保护电流需要, 达到节约牺牲阳极用量的目的。**方法** 在传统梯形阳极两侧增加两个翼翅, 降低接水电阻, 增加初期发生电流。翼翅优于本体快速溶解, 其表面积迅速减小, 发生电流随之降低。**结果** 质量与常规阳极相近的新型阳极, 初期发生电流增加 30%以上, 远高于设计值 10%, 初期极化完成后, 新型阳极发生电流快速降低, 达到与常规阳极相当的发生电流。**结论** 据此试验结果对导管架平台水下结构进行阴极保护设计, 可达到节约牺牲阳极用量的目的。

关键词: 海洋工程; 阴极保护; 牺牲阳极; 新型阳极

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.03.003

中图分类号: TJ01; TG174.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)03-0014-06

Design and Performance Research of New Type Sacrificial Anode for Marine Engineering (IV)—Application of Cathodic Protection of Jacket Platform

LIU Fu-guo¹, ZHANG Wei^{2,3}, WANG Xiu-tong⁴, YIN Peng-fei^{2,3}, HUANG Zhi-qiang¹,
ZHANG Guo-qing¹, HAN Bing^{2,3}, LI Xiang-yang⁵

(1.Design Company of Offshore Oil Engineering Co. Ltd, Tianjin 300451, China;

2.Qingdao NCS Testing and Protection Technology Co. Ltd, Qingdao 266071, China;

3.Qingdao Research Institute for Marine Corrosion, Qingdao 266071, China;

4.Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

5.Central Iron and Steel Research Institute, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: Objective To design a new type sacrificial anode by configuration optimization to increase the current output in the initial stage when it has the similar quality to that of conventional anode, to rapidly polarize the cathode to the protection interval. In the late stage, the current is going to be reduced, to meet the needs of the average and the end protection current demand, and achieve the purpose of saving sacrificial anode. **Methods** Two wings were added in both sides of the traditional anode, to reduce the water-resistance and increase the initial current. The rapid dissolution of the wings reduced the surface area rapidly and also the current output. **Results** For new type anode with similar qualities with the conventional anode, the initial current outputs increased by more than 30%, much higher than the designed value of

10%. After the initial polarization, the current outputs of the new type anode were rapidly reduced to the level equivalent to the conventional anode. **Conclusion** According to the test results, the cathodic protection design of jacket platform can achieve the purpose of saving sacrificial anode.

KEY WORDS: marine engineering; cathodic protection; sacrificial anode; new type anode

国内外阴极保护设计标准对海上钢质导管架平台不同阶段的保护电流密度值要求不同,比如 NACE-RP0176 (2001)^[1]推荐南中国海初期、平均和末期保护电流密度分别为 110, 35, 35 mA/m², 当海水温度高于 20 °C, 水深在 0~30 m, DNV-RP-B401 (2010)^[2-3]推荐的初期、平均和末期保护电流密度分别是 150, 70, 100 mA/m²。初期为平均电流密度的 2~3 倍, 为末期的 1.5~3 倍。初期设计较大的保护电流密度一方面是为了使构筑物快速极化到保护电位区间, 降低欠保护期间的腐蚀风险; 另一方面是为了快速形成钙镁沉积层, 降低后期对保护电流需求。由于初期时间较短^[4-5], 一般不超过 1 年, 比如文中介绍的导管架平台仅 4 个月就完成了初期极化, 相对于设计寿命 15~30 年平台来说时间非常短, 为了满足初期电流需求安装大量的牺牲阳极, 造成浪费。

该项目以常规梯形阳极为基础, 在阳极两侧增加两个翼翅, 设计了一种新型牺牲阳极, 通过增加表面积, 降低接水电阻, 增加初期电流输出^[6]。受边缘效应影响, 新型阳极翼翅优于本体快速溶解, 其表面积迅速减小, 发生电流随之降低, 初期极化完成后, 翼翅也消耗完全, 剩余本体阳极发生电流可以满足平均和末期较小的保护电流需要, 达到节约阳极用量的目的^[7]。

前期笔者针对小尺寸和中等尺寸的新型阳极和常规阳极分别进行了室内静态海水和实际动态海水的对比试验, 并发表了研究成果^[8-10]。研究表明, 通过构型优化的新型阳极在与常规阳极相当质量的基础上, 发生电流可以提高 48% 左右。在节约牺牲阳极用量近 50% 的基础上, 实现了新型阳极与常规阳极相当的发生电流和极化电位。同时发现了新型阳极翼翅优于本体溶解, 后期呈现出与常规阳极一致的圆柱形, 发生电流亦迅速降低到与常规阳极相近的现象, 与初始设计思路基本吻合。前期试验所用牺牲阳极尺寸小、消耗快、寿命短, 实海试验仅获得了常规阳极与新型阳极初期发生电流和初期极化电位的差异, 并未获得具有保护作用的钙镁沉积层形成后新型阳极和常规发生电流与极化电位的变化及其相关性, 即使后续研究采用了中等尺寸的牺牲阳极, 由于对实海环境的阴极保护设计考虑不足, 这些数据亦未获得。

基于以上原因, 在前期研究结果的基础上, 设计并浇筑成型了大尺寸、大质量的实际导管架平台用牺牲阳极, 并进行了工程化对比试验研究。文中通过对

比安装在新建导管架上的新型阳极 (质量为 291 kg) 和常规阳极 (质量为 288 kg) 发生电流与保护电位及其变化规律, 分析了阳极发生电流和极化电位与钙镁沉积层形成过程的相关性, 以期为后期新型阳极的大规模工程化应用提供基础参考。

1 导管架平台试验部分

1.1 新型阳极与常规设计

作为对比试验, 设计了质量相当的大尺寸、大质量的新型阳极和常规阳极各一种, 两种阳极详细尺寸和设计参数对比分别见图 1 和表 1, 材料为国标 A13 铝-锌-钢-硅阳极^[11]。

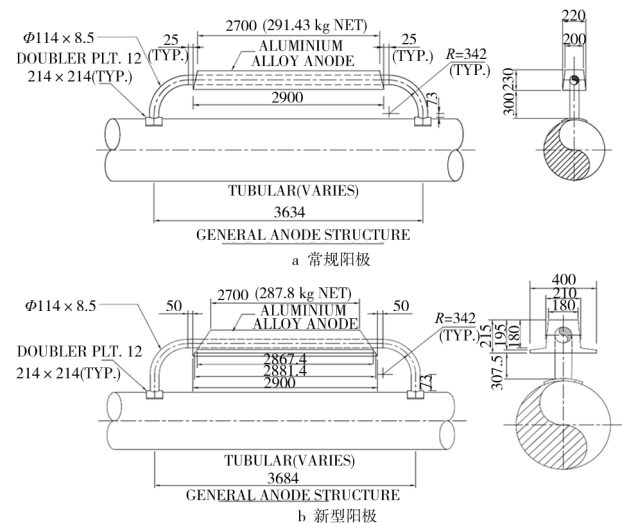


图 1 新型阳极和常规阳极尺寸 (单位 mm)

表 1 新型阳极和常规阳极对比

阳极类型	设计参数		
	阳极质量/kg	接水电阻/ Ω	发生电流/A
常规阳极	291.4	0.038	6.50
新型阳极	287.8	0.035	7.15

1.2 新型阳极在导管架上的安装

对比试验选择的导管架平台位于渤海南部的莱州湾, 龙口市东北 70 km, 服役区域平均水深 16 m, 于 2014 年 6 月下水服役。平台为 8 腿结构, 水下共有两层水平层, 分别为 -10.5 m 和 -16.1 m。水下结构阴极保护设计参考 DNV-RP-B401, 设计寿命为 30 年, 共安装牺牲阳极 286 支, 其中新型阳极 10 支。为保

证对比数据的可靠性,新型阳极替代传统阳极位置被安装到了-16.1 m水平层上,如图2所示。为了尽量减小因水温、流速、盐度、溶解氧等环境参数差异对试验结果的影响,分别在导管架-16.1 m水平层中心线两侧最近的对称位置选择了2对新型阳极和常规阳极进行对比试验,通过安装4支电位探头和4支电流探头组成的阴极保护监测检测系统,检测阳极发生电流和阳极保护区域钢结构表面电位及其随时间变化趋势,对比研究新型和常规阳极电流输出与极化过程的相关性。共采集了自2014年6月至2016年10月共计2年零4个月(约870天)的实海数据。

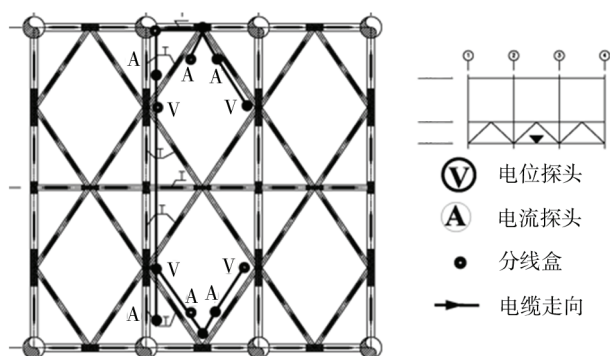


图2 新型阳极(图中标示T的位置)和电流探头、电位探头在导管架水平层上的安装位置

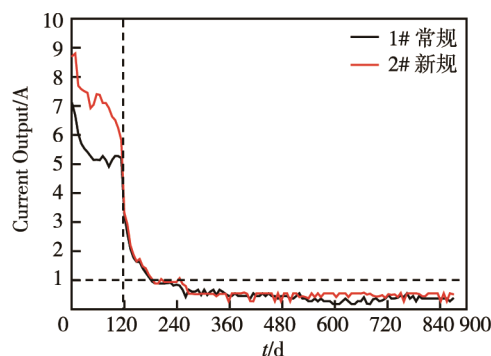
2 结果与讨论

2.1 1#常规与 2#新型阳极发生电流与保护电位对比

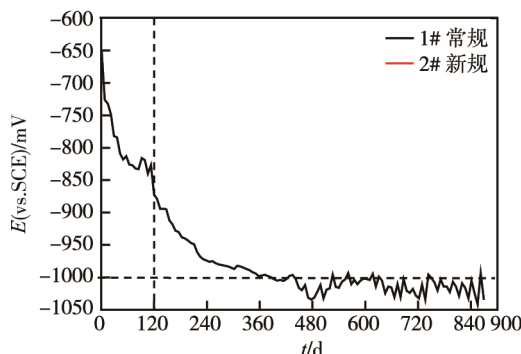
图3给出的是870天试验阶段内1#常规、2#新型阳极与常规发生电流和钢结构表面极化电位对比,可以看出,无论是发生电流还是保护电位均表现出较为明显的两个阶段的先快速后缓慢的下降过程。由图3a可知,第一阶段,新型阳极发生电流在初期的20 d内由8.71 A快速降低到7.57 A,20~120 d从7.50 A缓慢降低到5.82 A;常规阳极则在起始的50 d内发生电流由7.08 A快速下降到5.27 A,50~120 d从5.27 A缓慢降低到5.20 A。由图3b的极化电位也可以看出,无论新型阳极还是常规阳极,阳极附近的钢结构电位也经历了明显的先快速后缓慢的极化过程。新型阳极保护下的钢结构表面保护电位在初期的50 d内由-640 mV(相对于Ag/AgCl参比电极,下同)快速负移到-818 mV,50~120 d则是由-818 mV缓慢负移到-869 mV;常规阳极初期的60 d内保护电位由-651 mV快速极化到-813 mV,在60~120 d内由-813 mV缓慢极化到-827 mV。

在第二阶段,新型阳极发生电流在120~180 d由5.82 A快速降低到1.19 A,在180~870 d相当长的时间内,阳极发生电流缓慢降低并稳定在0.5 A左右;常规阳极在120~180 d发生电流由5.20 A快速降低到

1.11 A,180 d以后,发生电流亦缓慢降低并稳定在0.5 A附近。第二阶段极化电位变化趋势是:新型阳极保护下的钢结构在120~260 d,而常规阳极保护下的钢结构在120~360 d快速极化到-1000 mV,此后二者均在(-1000±25) mV范围内变化。



a 发生电流对比



b 表面保护电位对比

图3 1#常规与2#新型阳极发生电流与钢结构表面保护电位变化趋势

图4给出了试验的240 d内新型阳极较常规阳极发生电流增加值随时间的变化趋势。可以看出,下水初期,新型阳极初始发生电流8.71 A,常规阳极发生电流7.08 A,新型阳极发生电流超出常规阳极22%,远高于设计值10%。然后,发生电流增加值逐渐增加,到100 d时迅速降低(100 d内的平均电流增加值为34%),到150 d时新型阳极发生电流与常规阳极相当,以后的时间内,新型阳极发生电流与常规阳极接近,甚至出现新型阳极发生电流略低于常规阳极的情况。

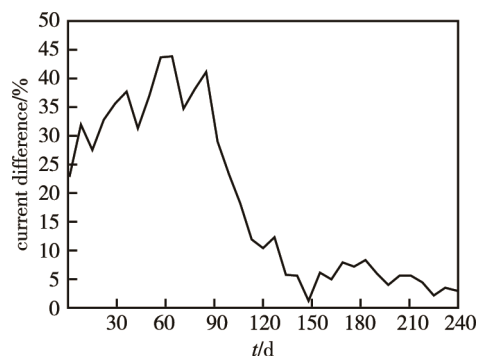


图4 2#新型阳极较1#常规阳极发生电流增加值随时间变化趋势

新型阳极保护下的钢结构在 22 d 时被极化到标准规定的保护电位区间^[1-3], 在 267 d 时被极化到 -1000 mV; 而常规阳极保护下的钢结构是分别在 43 d 和 386 d 极化到 -800 mV 和 -1000 mV, 说明新型阳极初期发生电流大, 被保护钢结构极化较快。新型阳极发生电流增加值初期逐渐增加, 应该是新型阳极本体与翼翅之间区域逐渐活化的结果, 前文已有详解^[9-10], 在此不再累述。

从图 3 和图 4 分析可知, 新型阳极和常规阳极下水初期发生电流均高于设计值, 这一点在前期的室内试验和实海试验中均发现了这一现象, 应该与初期驱动电压选值有关^[1-3]。国内海洋工程牺牲阳极设计驱动电压为 250 mV, 而实际上, 导管架平台下水初期, 铝阳极开路电位为 -1050 mV, 碳钢海水中自腐蚀电位为 -650 mV, 驱动电压达到 400 mV, 因此发生电流高于设计值。

第一阶段牺牲阳极发生电流快速降低应该是导管架被极化的结果, 从图 3b 可以看出, 在新型阳极发生电流快速下降的 20 d 内, 钢结构保护电位由 -640 mV 迅速负移到 -813 mV, 驱动电压由 410 mV 下降到 237 mV, 下降了近 1/2。常规阳极发生电流快速下降的 50 d 内, 钢结构保护电位由 -651 mV 迅速负移到 -818 mV, 驱动电压由 400 mV 下降到 232 mV, 下降亦接近 1/2。

有研究表明, 海水环境中, 钢结构表面在 -800 mV 时较难形成稳定有效的钙镁沉积层, 而在 -900~-1000 mV 时则可形成致密且具有较好保护作用的沉积层, 尤其是 -900 mV 左右, 形成的沉积层更为平整致密^[12-13]。第一阶段后期发生电流缓慢下降和钢结构表面极化电位缓慢负移相同步, 因此笔者认为这个阶段应该是钢结构表面钙镁沉积层逐渐形成并沉积覆盖的结果。新型阳极保护下的钢结构电位在第 50~120 天的 70 d 内由 -818 mV 缓慢负移到 -869 mV, 而常规阳极钢结构电位在第 60~120 天的 60 d 内由 -813 mV 缓慢极化到 -827 mV。以上两者电位区间均低于 -800 mV, 具备了形成具有保护作用的沉积层的条件, 尤其是新型阳极保护下的钢结构, 后期电位达到了 -869 mV, 接近 900 mV。

第二阶段的阳极发生电流快速降低得益于在第一阶段后期长达 70 d 极化过程形成的致密而具保护性的钙镁沉积层, 使得钢结构保护电流需求快速降低。有文献资料显示, 致密的钙镁沉积层的形成可以将保护电流成 10 倍降低^[1-2]。随着钢结构表面电位快速负移至 -1000 mV 附近, 与牺牲阳极的闭路电位 -1050 mV 差值仅 50 mV 左右, 驱动电压降低至历史低位, 加上钙镁沉积层的不断形成覆盖, 保护电流需求更低, 因此, 牺牲阳极发生电流亦达到历史低位。

2.2 3#常规与 4#新型阳极发生电流与保护电位对比

图 5 是另外一组对称位置 3#常规与 4#新型阳极发生电流和钢结构表面极化电位对比结果。可以看出, 3#常规与 4#新型阳极发生电流和表面极化电位变化亦呈现出两个阶段的先快速后缓慢的变化过程。第一阶段, 新型阳极发生电流在初期的 29 d 内快速降低, 由 9.12 A 降到 7.00 A, 30~120 d 缓慢降低, 由 7.00 A 降到 5.75 A; 常规阳极初期 22 d 内, 发生电流由 6.93 A 快速下降到 5.56 A, 22~120 d 从 5.56 A 缓慢降低到 4.68 A。新型阳极钢结构表面保护电位在初期 43 d 内由 -657 mV 快速极化到 -830 mV, 46~120 d 内缓慢负移至 -866 mV; 常规阳极初期的 50 d 内保护电位由 -666 mV 快速极化到 -824 mV, 在 50~120 d 内缓慢极化到 -866 mV。

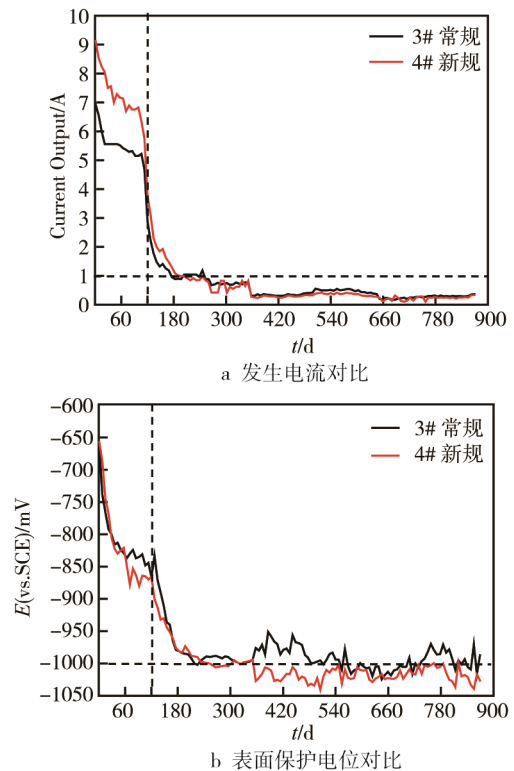


图 5 3#常规与 4#新型阳极发生电流与钢结构表面保护电位变化趋势

第二阶段, 新型阳极 120~180 d 发生电流由 5.57 A 快速降低到 1.09 A, 180 d 以后的测试周期内缓慢降低并稳定在 0.5 A 左右; 常规阳极 120~180 d 发生电流由 4.68 A 快速降低到 0.89 A, 180 d 以后, 电流缓慢降低亦稳定在 0.5 A 附近。第二阶段极化电位变化趋势是, 新型阳极和常规阳极保护下的钢结构均在 180 d 左右快速下降到了 -981 mV 附近, 且在 240 d 左右极化到 -1000 mV, 以后二者均稳定在 (-1000 ± 25) mV。

图6给出了初期240 d内新型阳极较常规阳极发生电流增加值随时间的变化趋势。下水初期新型阳极发生电流超出常规阳极31%，与第一组新型阳极发生电流增加值不同的是，这种较大的增加值一直持续到180 d，在此期间的平均输出电流增加值亦为31%。而后迅速降低，在195 d时常规阳极发生电流与新型阳极相当，200 d以后新型阳极发生电流略低于常规阳极15%左右。新型阳极和常规阳极钢结构均在29 d时被极化到 -800 mV，而被极化到 -1000 mV的时间分别是218 d和232 d，两者极化过程相近，新型阳极将被保护钢结构快速极化的优越性并未检测到。

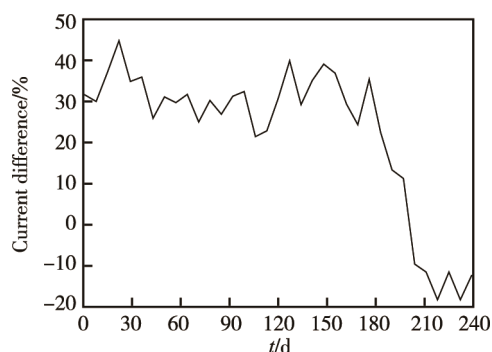


图6 4#新型阳极较3#常规阳极发生电流增加值随时间变化趋势

4#新型阳极和3#常规阳极的发生电流和极化电位及其变化趋势与前一组(2#新型和1#常规)相近，因此，笔者认为这两组对比牺牲阳极发生电流和极化电位变化过程的原因应该是相同的，在此不再赘述。

通过对以上两组新型阳极和常规阳极发生电流和极化电位分析可知，两组阳极的发生电流和极化电位均表现为明显的两个阶段的先快速后缓慢的下降过程。第一阶段的电流快速下降是被保护钢结构阴极极化快速负移，驱动电压迅速降低的结果。以发生电流缓慢降低和极化电位缓慢负移为特征的第一阶段后期，是钢结构表面具有保护作用的钙镁沉积层逐渐形成并覆盖的过程。在此期间，钢结构表面电位缓慢负移到有利于快速形成沉积层的电位区间^[12-13]，驱动电压逐渐降低，阳极发生电流亦缓慢降低。从第二阶段初期阳极发生电流的再次快速降低，可以推测在第一阶段的后期，钢结构表面应该是形成了具有良好保护作用的钙镁沉积层。钙镁沉积层的沉积与覆盖有效地降低了金属表面发生电化学反应的面积，同时阻碍了受扩散控制的氧还原反应，大大降低了对阴极保护电流的需求。因此，阳极发生电流快速降低，钢结构表面电位迅速负移。第二阶段后期保护电流和极化电位均处于稳定状态，应该是钢结构表面沉积层的生成与溶解过程达到平衡，沉积层性能趋于稳定的结果。

以上两组对比试验中，新型阳极初期发生电流均高于常规阳极，发生电流的增加值均高于设计值，与

前期的实海试验的结果相一致。被保护钢结构极化到保护电位区间，钙镁沉积层形成后，新型阳极发生电流快速下降，达到了与常规阳极相当的发生输出。据此可知，如果按照目前国内海洋导管架平台阴极保护设计标准，这种初期发生电流大，初期极化完成后，新型阳极降低到与常规阳极相当的发生电流，可以达到节约牺牲阳极用量的目的。

有两个现象值得注意：

1) 第一组新型阳极发生电流高于常规阳极持续了近90 d，而第二组持续了180 d，出现这种现象的具体原因仅根据目前掌握的试验数据并不能给出，可能与两组对比阳极所处的海洋环境条件，或者被保护钢结构表面状态的差异所致。

2) 第一组对比试验中新型阳极优于常规阳极，将被保护钢结构极化到保护电位区间，缩短了极化时间，降低了欠保护期间的腐蚀风险，与前期实海对比试验结果相符。第二组新型阳极与常规阳极的极化过程相近，新型阳极并未缩短极化到保护电位区间的极化时间，据此并不能得出新型阳极可将被保护体快速极化、缩短极化时间的结论。

3 结论

1) 质量相近的新型阳极初期发生电流高于常规阳极34%和31%，导管架结构表面具有保护作用的钙镁沉积层形成后，新型阳极发生电流快速下降，达到了与常规阳极相当的发生输出。据此结果对导管架平台水下结构进行阴极保护设计，可达到节约牺牲阳极用量的目的。

2) 新型阳极和常规阳极发生电流和极化电位均表现为明显的两个阶段的先快速后缓慢的下降过程。第一阶段电流快速下降，被保护钢结构快速极化，驱动电压迅速降低，后期电流缓慢降低和电位缓慢负移应与钢结构表面具有保护作用的钙镁沉积层的形成过程相对应。第二阶段发生电流快速降低应该是沉积层覆盖的结果，后期保护电流和极化电位均处于稳定状态应该归因于沉积层的生成与溶解过程达到平衡，沉积层性能趋于稳定。

参考文献：

- [1] NACE SP0176—2007, Corrosion Control of Submerged Areas of Permanently Installed Steel Offshore Structures Associated with Petroleum Production[S].
- [2] DNV Standard DNV-RP-B401—2010, Cathodic Protection Design[S].
- [3] SY/T10008—2010, 海上钢质固定石油生产构筑物的腐蚀控制[S].

- [4] 常炜, 栗艳霞, 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, 11(3): 27-30.
- [5] 陈武, 杨洋, 龙云, 等. 海洋石油平台导管架阴极保护的实施和改进[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2014, 31(5): 44-47.
- [6] 张经磊. 牺牲阳极的电阻公式[J]. 海洋科学, 1987(5): 54-58.
- [7] 中国海洋石油总公司, 海洋石油工程股份有限公司. 异型截面牺牲阳极: 中国, CN101463479A[P]. 2009-06-24.
- [8] 张伟, 尹鹏飞, 张有慧, 等. 海洋工程用新型牺牲阳极设计与性能研究(I)——小尺寸阳极静态海水试验研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(2): 63-70.
- [9] 张伟, 尹鹏飞, 刘福国, 等. 海洋工程用新型牺牲阳极设计与性能研究(II)——小尺寸阳极实海试验研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 101-106.
- [10] 张伟, 杨海洋, 陈亚林, 等. 海洋工程用新型牺牲阳极设计与性能研究(III)——中尺寸阳极实海试验研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(2): 46-50.
- [11] GB/T 4948—2002, 铝-锌-钢系合金牺牲阳极[S].
- [12] 朱锡昶, 葛仁淦, 朱颖. 大电流密度下阴极产物膜的探讨[J]. 海洋工程, 1997, 15(1): 60-69.
- [13] 温国谋, 郑辅养. 海水中阴极保护时钙质沉积层的形成及其应用[J]. 腐蚀与防护, 1995(1): 50-53.