

Al-Zn-Sn-Ce 牺牲阳极干湿交替环境电化学性能研究

张一晗¹, 杨美桐^{1,2}, 张海兵¹, 马力¹, 李祯¹, 段体岗¹

(1. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266237)

(2. 辽宁石油化工大学 机械工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: 目的 为满足高强钢装备的阴极保护要求, 开展新型干湿交替环境牺牲阳极电化学性能测试, 评价材料的阴极保护效果。**方法** 采用高温熔炼方法, 制备 Al-Zn-Sn-Ce 低电位牺牲阳极试样, 进行不同浸水率下(干湿态环境时间比为 1:1、3:1 和 7:1) 的干湿交替环境牺牲阳极电化学性能试验、电化学表征测试及腐蚀微观形貌表征, 通过对比试验数据和材料形貌表征结果, 综合分析铝合金牺牲阳极在干湿交替环境下的电化学性能, 探究干湿交替环境因素对阳极溶解行为的影响。**结果** Al-Zn-Sn-Ce 牺牲阳极在多种试验环境下的工作电位为 -0.70~ -0.81 V (vs. SCE), 符合高强钢阴极保护电位需求, 阳极表面溶解形貌相对均匀, 表面阴阳极电化学微区分布均匀。随着干湿态试验环境时间比的增加, 阳极工作电位出现正移, 干态环境下表面腐蚀产物的沉积和结壳导致阳极活化溶解能力下降, 而干湿态环境时间比最大时, 阳极自腐蚀反应得到一定的抑制, 阳极电流效率均保持在 75% 以上。**结论** 随着干湿态试验环境时间比的增加, 牺牲阳极在干湿交替试验环境中的工作电位出现正移。由于干态环境下表面腐蚀产物的沉积和结壳, 导致阳极活化溶解能力下降, 但自腐蚀反应得到抑制。Al-0.7Zn-0.1Sn-0.1Ce 低电位牺牲阳极在复杂干湿交替环境中表现出良好的阴极保护性能。

关键词: 干湿交替环境; 水下装备; 牺牲阳极; 电化学

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)06-0075-08

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2023.06.010

Electrochemical Performance of Al-Zn-Sn-Ce Sacrificial Anode in Alternating Dry and Wet Environment

ZHANG Yi-han¹, YANG Mei-tong^{1,2}, ZHANG Hai-bing¹, MA Li¹, LI Zhen¹, DUAN Ti-gang¹

(1. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Shandong Qingdao 266237, China; 2. School of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Liaoning Fushun 113001, China)

ABSTRACT: The work aims to carry out the electrochemical performance test of the new sacrificial anode in alternating dry

收稿日期: 2022-08-15; 修订日期: 2022-09-28

Received: 2022-08-15; **Revised:** 2022-09-28

作者简介: 张一晗 (1995—), 男, 硕士。

Biography: ZHANG Yi-han (1995-), Male, Master.

通讯作者: 张海兵 (1983—), 男, 硕士。

Corresponding author: ZHANG Hai-bing (1983-), Male, Master.

引文格式: 张一晗, 杨美桐, 张海兵, 等. Al-Zn-Sn-Ce 牺牲阳极干湿交替环境电化学性能研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(6): 075-082.

ZHANG Yi-han, YANG Mei-tong, ZHANG Hai-bing, et al. Electrochemical Performance of Al-Zn-Sn-Ce Sacrificial Anode in Alternating Dry and Wet Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(6): 075-082.

and wet environment to evaluate the cathodic protection effect of the material, so as to meet the cathodic protection requirements of high-strength steel equipment. Al-Zn-Sn-Ce low-potential sacrificial anode samples were prepared by high-temperature smelting method and subject to electrochemical performance test, electrochemical characterization test and corrosion micro-morphology characterization of sacrificial anode in alternating dry and wet environments at different water immersion rates (the time ratio of dry and wet conditions was 1:1, 3:1, and 7:1). By comparing the test data and material morphology characterization results, the electrochemical performance of aluminum alloy sacrificial anode in the alternating dry and wet environment was comprehensively analyzed, and the effect of alternating dry and wet environment factors on the anodic dissolution behavior was explored. The working potential of Al-Zn-Sn-Ce sacrificial anode in various test environments was $-0.70\sim-0.81$ V (vs.SCE), which met the requirements of high-strength steel cathodic protection potential. The dissolution morphology of anode surface was relatively uniform, and the electrochemical micro-regions of anode and cathode on the surface were evenly distributed. With the increasing time ratio of dry and wet test environment, the working potential of the anode shifted positively and the deposition and crusting of the surface corrosion products in the dry environment led to a decrease in the anodic activation and dissolving ability. The corrosion reaction was suppressed to a certain extent, and the anode current efficiency was maintained above 75%. With the increase of the time ratio of the dry and wet test environment, the working potential of the sacrificial anode in the alternating dry and wet test environment shifts positively. The self-corrosion reaction is inhibited, and the Al-0.7Zn-0.1Sn-0.1Ce low-potential sacrificial anode exhibits good cathodic protection performance in a complex alternating wet and dry environment.

KEY WORDS: alternating dry and wet environment; underwater equipment; sacrificial anode; electrochemical

随着我国海洋资源的不断开发和海洋工程装备的研究发展，受轻量化需求和低成本等因素的推动，高强钢材料在大型船舶和海洋工程设施上的应用量和应用范围不断扩大。如海洋石油 981 平台已大量使用 690 MPa 级高强钢，自升式平台桩腿、悬臂梁等部件普遍采用 690 MPa 级以上的高强钢。由于高强钢材料普遍具有氢脆敏感性，且强度级别越高，氢脆敏感性越明显，采用常规的铝合金牺牲阳极材料进行阴极保护时，较负的保护电位可能引发高强钢表面发生析氢反应，产生的氢扩散至材料内部后，将诱发氢致开裂等严重问题，威胁海洋工程装备服役安全^[2-6]。DNV 等国外相关标准推荐屈服强度大于 550 MPa 的高强钢应采用 $-0.77\sim-0.83$ V (vs. Ag/AgCl) 范围内的合理阴极保护电位，而目前普遍使用的铝合金牺牲阳极工作电位一般在 -1.0 V (vs. Ag/AgCl) 以下，无法满足高强钢阴极保护的需求。因此，需要针对高强钢材料的阴极保护开发工作电位相对较正的低电位牺牲阳极材料^[7-11]。

此外，海洋环境工程装备的局部环境特征也对牺牲阳极材料提出了新的要求，如平台桩腿、压载水舱等结构部位在服役过程中会频繁经历干湿交替变化，牺牲阳极材料面临更为复杂的服役环境变化情况。研究表明，干湿交替环境对牺牲阳极的性能会产生显著影响，在全浸海水环境中，阳极表面的活化溶解会形成腐蚀产物，阳极离开水面进入空气干态环境中时，腐蚀产物将脱水氧化，形成稳定的氧化物附着层^[12-13]。同时，残留的钙镁离子易与空气中的 CO₂ 反应形成碳酸盐，与腐蚀产物混合，经过干态环

境中干燥脱水后，在阳极表面形成硬质结壳层。该结壳层重新浸入海水后也难以溶解，从而阻隔阳极基体与海水介质的接触，抑制了阳极的进一步持续溶解。阳极表面结壳还将导致阳极电位正移，阳极与被保护金属结构物之间的电位差减小，保护体系的驱动电位降低，输出电流大幅度下降，从而使牺牲阳极的服役性能进一步降低，引发装备腐蚀防护失效的安全问题。因而，高强钢装备构件用牺牲阳极材料在满足电位要求的同时，还需具备良好的交变环境适应性，研制适用于干湿交变环境的牺牲阳极材料成为高强钢装备腐蚀防护领域的重中之重^[14-17]。

本文针对高强钢材料干湿交替环境阴极保护需求，基于前期 Al-Zn-Sn-Ce 铝合金牺牲阳极研究成果，通过对阳极进行干湿交替环境电化学性能试验等表征测试，综合评价阳极的工作性能。依据材料微观形貌表征结果，探究环境因素对阳极溶解行为的影响，最终得到低电位牺牲阳极材料在多种干湿交替环境下的工作性能参数及变化规律，为海洋工程装备的安全服役提供可靠保障。

1 试验

1.1 材料及其成分

试验对象为 Al-0.7Zn-0.1Sn-0.1Ce 低电位牺牲阳极，熔炼牺牲阳极所用金属和合金均为高纯度原料，采用自然浇铸成形方法制备。使用 ICAP7400 型电感耦合等离子体发射光谱仪测定牺牲阳极的实际元素含量，具体合金元素成分及实际含量见表 1。

表 1 Al-Zn-Sn-Ce 低电位牺牲阳极成分(质量分数, %)
Tab.1 Composition of Al-Zn-Sn-Ce low-potential
sacrificial anode (mass fraction, %)

Chemical composition	Quality fraction design value	Quality fraction of test value
Al	98.95	98.82
Zn	0.7	0.655
Sn	0.1	0.101
Ce	0.1	0.100

1.2 干湿交替环境电化学性能试验

参考 GB/T 17848 电化学性能评价试验要求, 将 Al-0.7Zn-0.1Sn-0.1Ce 牺牲阳极材料切割加工为 $\phi 16\text{ mm} \times 48\text{ mm}$ 规格的圆柱形阳极试样。试验前, 用无水乙醇对试验试样表面进行清洗, 去除牺牲阳极试样表面异物及金属碎屑, 将试样完全烘干后进行称量。用防水绝缘胶带将阳极试样封装完好, 试样表面留取 14 cm^2 的工作面积。

电化学性能试验采用 316L 不锈钢筒作为阴极, 阴极工作面积为 840 cm^2 , 选用恒电流试验法评价牺牲阳极材料的性能。在模拟服役环境中施加恒定电流测定牺牲阳极电化学性能, 试验环境分别为干湿态时间比为 1:1、3:1 和 7:1 的干湿交替环境 (A、B 和 C 环境), 具体参数见表 2。试样湿态浸水单次时间为 1 d, 共进行 5 次干湿态循环周期, 试验时间为 10、20、40 d, 在湿态浸水期间, 电流密度数值为 1 mA/cm^2 。试验介质为青岛海域的新鲜海水, 温度为 $(20 \pm 2.0)\text{ }^\circ\text{C}$ 。单次循环周期内, 初期和末期使用饱和甘汞参比电极分别记录阳极工作电位。试验结束后, 清洗干燥阳极试样, 进行称量, 计算牺牲阳极实际电容量和电流效率。

表 2 干湿交替环境试验参数
Tab.2 Test parameters of alternating dry and wet environment

Alternating dry and wet environment	Dry-wet state time ratio	Experiment time/d	Wet state time/d	Dry state time/d
A	1:1	10	5	5
B	3:1	20	5	15
C	7:1	40	5	35

1.3 电化学测试

采用完成干湿交替环境牺牲阳极电化学性能试验后的圆柱形牺牲阳极试样, 试样表面积为 1 cm^2 , 试验前用环氧树脂进行封装。电化学阻抗谱测试使用 PARSTAT 2273 电化学工作站进行测试, 参比电极采用饱和甘汞电极, 辅助电极选用铂电极。测试时, 首先将试样置于常规海水中进行浸泡活化 1 h, 期间收集电位变化数据, 待阳极开路电位稳定后, 进行电化

学阻抗谱测试, 测试频率区间为 $10^{-2}\sim 10^5\text{ Hz}$, 激励信号幅值为 10 mV 。

动电位极化曲线测试使用 PARSTAT 2273 电化学工作站对试样表面施加极化电流, 其他测试条件与电化学阻抗谱相同, 极化电位扫描范围为 -0.1 (vs. OCP) $\sim -0.6\text{ V}$ (vs. SCE), 扫描速度为 0.167 mV/s , 扫描步进为 1 mV 。

1.4 微观形貌表征

采用 Versa SCANSKP 测试模块进行扫描开尔文探针测试 (SKP) 获取阳极表面微区电位分布情况, 测试试样选用完成电化学性能试验后的阳极样品, 测定表面电位分布差异情况。对试验后的 Al-Zn-Sn-Ce 低电位牺牲阳极进行酸洗处理, 并使用去离子水及无水乙醇清洗干燥后进行其他表征测试。

使用 KH-8700 三维视频图像系统采集牺牲阳极溶解表面局部形貌, 并通过 3D 模型系统建立三维图像模型模拟试样表面微观溶解形貌。使用 ZEISS ULTRA 55 场发射扫描电镜 (SEM) 观察试验后阳极表面的微观尺度腐蚀形貌。

2 结果和讨论

2.1 电化学性能

不同干湿交替环境下, 牺牲阳极在电化学性能试验中的工作电位变化情况如图 1 所示。采集每次干湿态交替循环周期前后的电位数值, 并进行趋势分析。可以发现, 在干湿交替环境下, 牺牲阳极的工作电位基本呈现缓慢正移趋势。随着干湿态时间比的增加, 完整试验周期下阳极的工作电位平均值不断提高, 工作电位变化范围为 $-0.71\sim -0.80\text{ V}$ (vs. SCE, 下同)。在干湿态时间比为 7:1 时, 阳极工作电位在试验周期结束时达到 -0.70 V , 较初始活化溶解状态工作电位正移约 0.1 V 。在试验后半周期, 电位保持稳定浮动

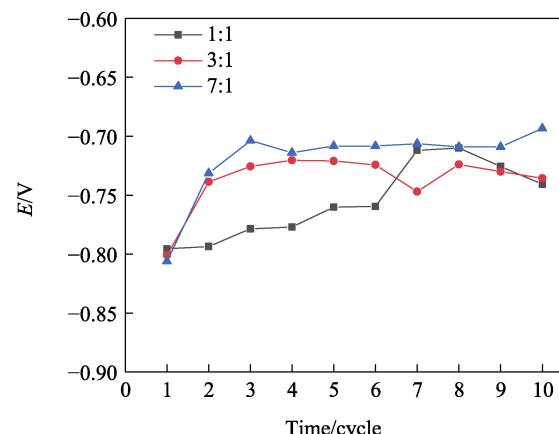


图 1 牺牲阳极工作电位变化曲线
Fig.1 Working potential curve of sacrificial anode

状态,说明牺牲阳极在长时间干态环境下,极化水平的变化幅度较小,腐蚀产物层维持在稳定状态。

不同干湿交替环境下,牺牲阳极的电化学性能试验结果见表3。通过分析牺牲阳极电容量与电流效率数据可以得到,当阳极试样试验环境由干湿态时间比1:1增加至3:1时,阳极电流效率有明显增加。当干湿态时间比增加至7:1时,电流效率数值变化不明显,

说明干态环境时间较短时,阳极受到环境因素的影响较大。此时,阳极表面未形成稳定腐蚀产物沉积层,易引发自腐蚀反应程度变化。随着干态环境时间的延长,阳极表面稳定更新的氧化膜与腐蚀产物层抑制了自腐蚀反应的进行,电流效率得到提高。但由于表面形成腐蚀产物层会使阳极工作电位产生变化,不利于阳极进一步活化溶解。

表3 牺牲阳极电化学性能试验结果
Tab.3 Electrochemical performance test results of sacrificial anode

Alternating dry and wet environment	Working potential (vs. SCE)/V	Theoretical capacity/ $(A \cdot h \cdot kg^{-1})$	Actual capacity/ $(A \cdot h \cdot kg^{-1})$	Current efficiency/%
A	-0.71~0.80	2 959.41	2 266.44	76.58
B	-0.73~0.81	2 959.41	2 375.61	80.27
C	-0.70~0.81	2 959.41	2 375.58	80.27

牺牲阳极溶解腐蚀形貌如图2所示。由溶解形貌变化情况可以发现,随着干态环境周期时间的增加,阳极试样表面分布的较深蚀坑逐渐消失,蚀坑深度不断减小,阳极晶界腐蚀现象得到一定缓解。当干湿态时间比增加至7:1时,阳极表面出现部分局部腐蚀形貌,说明阳极腐蚀产物的堆积影响了活化基体的溶解,表面活性点不断减少^[18-19]。

2.2 电化学测试曲线

不同干湿交替环境下的牺牲阳极电化学阻抗谱Nyquist图如图3a所示。通过观察可以发现,阻抗谱中高频区的容抗弧半径受到试验环境干湿态时间比的显著影响,相比干湿态时间比为1:1时,阳极在干湿态时间比为3:1和7:1试验环境中,测定的容抗弧



图2 不同干湿态时间比下牺牲阳极的活化溶解形貌
Fig.2 Activation and dissolution morphology of sacrificial anode under different dry wet time ratios

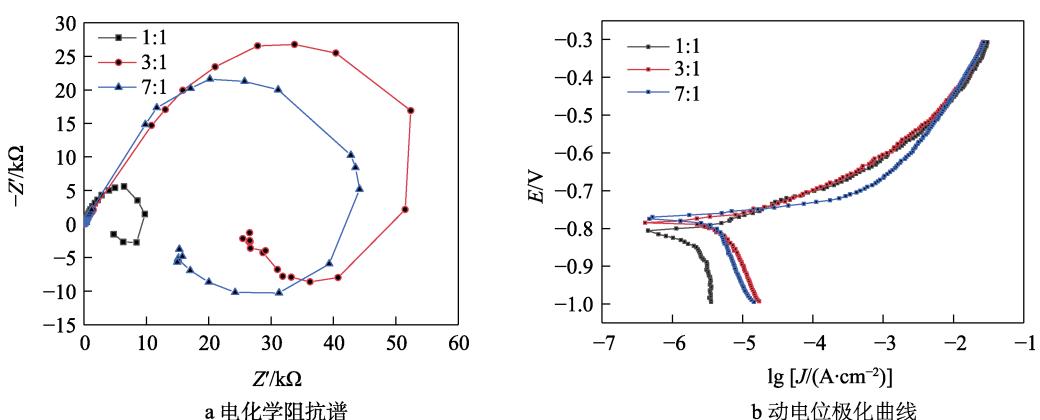


图3 牺牲阳极常规电化学测试
Fig.3 Conventional electrochemical test of sacrificial anode: a) electrochemical impedance spectrum; b) potentiodynamic polarization curve

半径约为前者的 4~5 倍。其反映的是铝阳极表面溶解反应的电化学过程, 可见干湿态时间比数值较高时, 阳极活化反应受到抑制。在低频区域出现的感抗弧特征则说明, 在阳极表面可能出现了腐蚀产物的附着。随着干态环境时间的增加, 阳极溶解阻力表现出先增大、后减小的趋势。随着阳极表面腐蚀产物的附着量和结壳程度不断增大, 活性离子运动过程受到进一步阻碍。当干态环境时间延长后, 阳极表面腐蚀产物的溶解脱落得到缓解, 阳极活性金属离子运动过程得以提升^[20-23]。

牺牲阳极在不同干湿交替环境下的阳极极化曲线如图 3b 所示。在多种试验环境中, 阳极的自腐蚀电位随干态时间的增加逐渐正移至 -0.77 V 左右, 且曲线线型较平滑, 未出现明显钝化现象。在干湿态时间比为 3:1 和 7:1 试验环境中, 牺牲阳极表现出相近的自腐蚀电位。在相同极化电位下, 阳极电流密度随着干态时间的增加而增大, 可以推断出干态环境中阳极表面堆积的腐蚀产物在形成稳定沉积层后更易脱落分解, 阳极基体与海水介质接触面积增加, 促进了阳极表面的活化溶解^[24]。通过表 4 中的阳极极化曲线拟合结果也可以发现, 阳极自腐蚀电流密度处于 10^{-6} A/cm² 数量级。随着干湿态时间比增加, 阳极自腐蚀电流密度呈先增大、后减小的趋势, 阳极自腐蚀过程受到表面腐蚀产物的影响, 自腐蚀反应程度在干湿态

时间比最大时出现下降, 阳极电流效率得到一定提升。同时, 随着干态时间的增加, 阳极极化率呈降低趋势, 在干湿态时间比为 7:1 时达到 54.794 mV, 阳极活化溶解进程得到明显促进, 表现出良好的电化学性能。

表 4 动电位极化曲线拟合结果

Tab.4 Fitting results of potentiodynamic polarization curve

Alternating dry and wet envi- ronment	$I_{corr}/$ (A·cm ⁻²)	E_{corr} (vs. SCE)/V	β_a /mV
A	2.671×10^{-6}	-0.812 3	70.733
B	7.832×10^{-6}	-0.783 4	78.869
C	4.024×10^{-6}	-0.773 6	54.794

2.3 微观溶解形貌

酸洗处理后, 牺牲阳极表面溶解形貌的三维视频图像如图 4 所示。可以观察到, 在干湿交替环境中, 牺牲阳极表面的高度差约为 1 000 μm, 表面相对光滑, 无突出物, 但存在明显蚀坑。随着干态时间的增加, 阳极试样表面高度差不断增加, 说明在干湿交替环境中, 阳极活化溶解过程受到的影响较小, 阳极消耗量保持稳定。随着表面腐蚀产物沉积成为稳定壳层, 阳极溶解阻力不断增大, 阳极出现局部腐蚀现象, 造成表面蚀坑的深度增大。

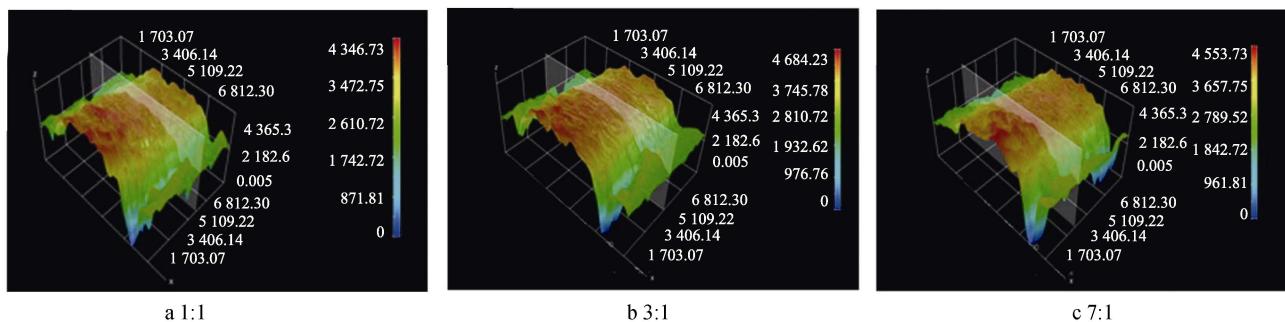


图 4 不同干湿态时间比下牺牲阳极活化溶解表面三维图像

Fig.4 3D image of activation and dissolution surface of sacrificial anode under different dry wet time ratios

牺牲阳极表面的腐蚀微观形貌如图 5 所示。可以发现, 牺牲阳极在完整周期干湿交替环境试验后, 表面均匀分布有各类蚀坑, 蚀坑深度差异较大。在干湿

时间比为 1:1 和 3:1 时, 阳极表面蚀坑深度较浅, 蚀坑数量较多, 阳极活化点位数量较多。当干态环境时间继续增加时, 阳极表面出现较大蚀坑和明显裂纹

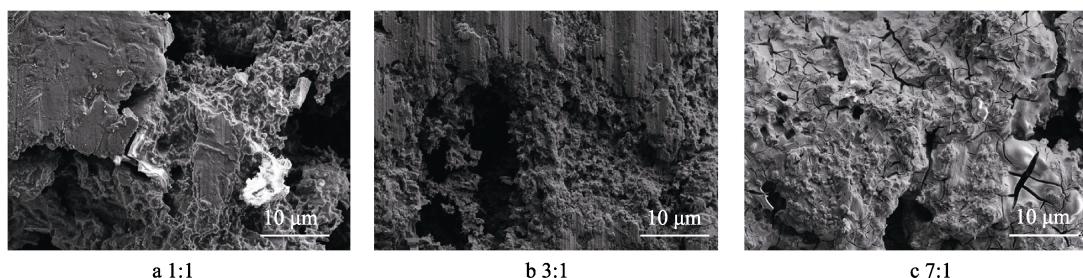


图 5 不同干湿态时间比下牺牲阳极溶解表面微观形貌

Fig.5 Micromorphology of dissolution surface of sacrificial anode under different dry wet time ratios

形貌。这是由于阳极工作环境导致阳极活性下降, 工作电位较正引发活性下降, 阳极出现局部腐蚀现象, 阳极表面出现机械疏松结构, 合金内部结合力减弱, 造成基体开裂。

牺牲阳极电化学性能试验前后, 试样表面微区的电位分布情况如图 6a 所示。可以观察到, 未进行干湿交替环境牺牲阳极电化学性能试验前, 阳极表面电位的分布较为均匀, 电位范围为 $-0.6\sim-0.9$ V, 电位数值区间较负, 阳极活性良好。在经历干湿交替环境后,

阳极表面的电位分布表明, 电位出现 0.3 V 左右的正移(如图 6b 所示), 且存在明显阳极相, 这些分布不均的阴阳极区域导致阳极出现不同程度的局部腐蚀现象。随着干态环境时间的增加, 阳极表面腐蚀产物的附着量和结壳程度不断增大, 活性基体的暴露受到阻碍, 阳极出现产物覆盖的蚀坑, 电位差达到约 0.4 V, 导致阳极自腐蚀反应受到影响。当干态环境时间继续延长后, 可见阴阳极区域电位差异得到缓解, 这是由于溶解活化过程趋于稳定, 阳极极化程度得到缓解^[25]。

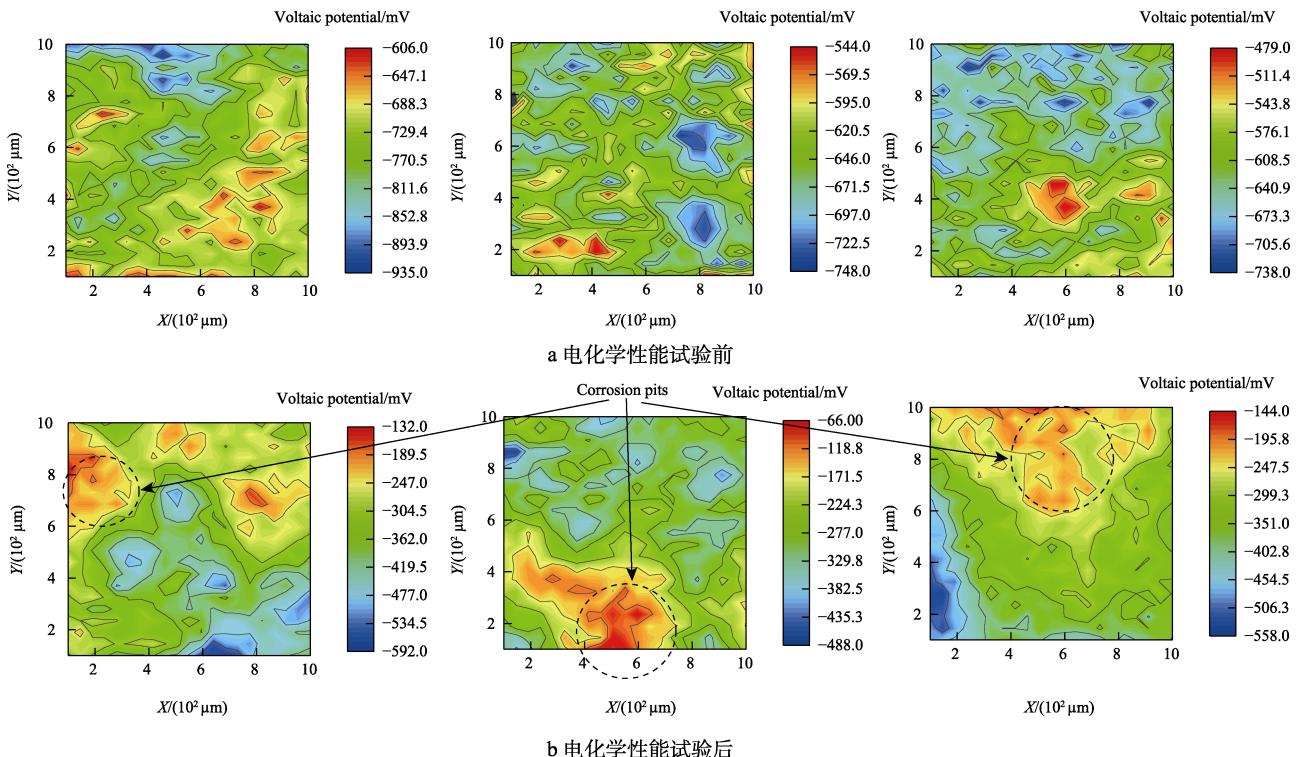


图 6 牺牲阳极微区电位分布

Fig.6 Potential distribution map of sacrificial anode micro-regions: a) before electrochemical performance test; b) after electrochemical performance test

3 结论

1) 通过控制合金元素含量制备了 Al-0.7Zn-0.1Sn-0.1Ce 低电位牺牲阳极。在多种干湿交替环境中进行电化学性能试验时, 其工作电位为 $-0.70\sim-0.81$ V (vs.SCE), 基本符合高强钢阴极保护电位需求, 阳极表面溶解形貌相对均匀。

2) 随着干湿态试验环境时间比的增加, 牺牲阳极在干湿交替试验环境中的工作电位出现正移。可以发现, 阳极在干态环境下, 表面腐蚀产物的沉积和结壳导致活化溶解能力下降, 而干湿态环境时间比最大时, 阳极自腐蚀反应得到一定抑制, 阳极电流效率达到 80.27%, 阳极极化率略高于 50%, 极化程度较低, 阳极活化溶解过程得到稳定维持, 适用于进行干湿交替环境中水下装备高强钢材料的阴极保护。

参考文献:

- [1] 陈峯, 王凯, 江泽新, 等. 船用高强钢焊接技术的研究现状与展望[J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 65-75.
CHEN Feng, WANG Kai, JIANG Ze-xin, et al. Research Status and Prospects of Marine High Strength Steel Welding Technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(4): 65-75.
- [2] FERNANDEZ J. Retraction Statement: Stress Corrosion Cracking of High Strength Stainless Steels for Use as Strand in Prestressed Marine Environment Concrete Construction[J]. Materials and Corrosion, 2016, 67(8): 888.
- [3] 张万友, 王鑫焱, 郜丽娟, 等. 阴极保护技术中牺牲阳极材料的研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(5): 420-424.
ZHANG Wan-you, WANG Xin-yan, XI Li-juan, et al. Research Progress of Sacrificial Anode Materials in Ca-

- thodic Protection Technology[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(5): 420-424.
- [4] 孙明先, 马力, 张海兵, 等. 铝合金牺牲阳极材料的研究进展[J]. 装备环境工程, 2018, 15(3): 9-13.
SUN Ming-xian, MA Li, ZHANG Hai-bing, et al. Research Progress in Aluminum Alloy Sacrificial Anode Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(3): 9-13.
- [5] 孙海静, 覃明, 李琳. 深海低溶解氧环境下 Al-Zn-In-Mg-Ti 牺牲阳极性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(6): 508-516.
SUN Hai-jing, QIN Ming, LI Lin. Performance of Al-Zn-in-Mg-Ti Sacrificial Anode in Simulated Low Dissolved Oxygen Deep Water Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2020, 40(6): 508-516.
- [6] BILLINGHAM J, SHARP J V, SPURRIER J, et al. Review of the Performance of High Strength Steels Used Offshore[M]. Sulffolk UK: Health and Safety Executive, 2003.
- [7] 高心心, 郭建章, 张海兵. 1000MPa 级高强钢焊接件的氢脆敏感性研究[J]. 材料导报, 2017, 31(6): 93-97.
GAO Xin-xin, GUO Jian-zhang, ZHANG Hai-bing. Hydrogen Embrittlement Susceptibility of 1000MPa Grade High Strength Steel Weldment[J]. Materials Review, 2017, 31(6): 93-97.
- [8] 徐宏妍, 李延斌. 铝基牺牲阳极在海水中的活化行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(3): 186-192.
XU Hong-yan, LI Yan-bin. Activation Behavior of Aluminum Sacrificial Anodes in Sea Water[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(3): 186-192.
- [9] 李威力, 闫永贵, 陈光, 等. 合金元素对铝基牺牲阳极性能的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(2): 127-132.
LI Wei-li, YAN Yong-gui, CHEN Guang, et al. Effect of Alloy Elements on Electrochemical Performance of Aluminum Sacrificial Anode[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(2): 127-132.
- [10] 宋曰海, 郭忠诚, 樊爱民, 等. 牺牲阳极材料的研究现状[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(1): 24-28.
SONG Yue-hai, GUO Zhong-cheng, FAN Ai-min, et al. Current State of Research on Sacrificial Anode Materials[J]. Corrosion Science and Technology Protection, 2004, 16(1): 24-28.
- [11] GURRAPPA I, KARNIK J A. Effect on tin-activated aluminum-alloy anodes of the addition of bismuth[J]. Corros Prev Control, 1994, 41: 117-121.
- [12] REDING J T, NEWPORT J J. The Influence of Alloying Elements on Aluminum Anodes in Sea Water[J]. Corrosion Engineering Digest, 1967, 16(2): 68-70.
- [13] 马力, 曾红杰, 闫永贵, 等. Ga 含量对 Al-Ga 牺牲阳极电化学性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(2): 125-127.
MA Li, ZENG Hong-jie, YAN Yong-gui, et al. Effects of Ga Content on Electrochemical Properties of Al-Ga Sacrificial Anodes[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(2): 125-127.
- [14] PAUTASSO J P, LE GUYADER H, DEBOUT V. Low Voltage Cathodic Protection for High Strength Steels: Part 1—Definition of a New Aluminum Galvanic Andoe Material[C]//Corrosion 1998. San Diego: [s. n.], 1996.
- [15] 潘大伟, 高心心, 马力, 等. 模拟深海环境中高强钢的阴极保护准则[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(3): 225-229.
PAN Da-wei, GAO Xin-xin, MA Li, et al. Cathodic Protection Criteria of High Strength Steel in Simulated Deep-Sea Environment[J]. Corrosion & Protection, 2016, 37(3): 225-229.
- [16] NACE Standard RP0176—2003, Standard Recommended Practice in Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Structures Associated with Petroleum Production[S].
- [17] Recommended Practice DNV-RP-B401, Cathodic Protection Design[S].
- [18] 马景灵, 文九巴, 卢现稳, 等. 铝合金阳极腐蚀过程的电化学阻抗谱研究[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(6): 373-376.
MA Jing-ling, WEN Jiu-ba, LU Xian-wen, et al. Electrochemical Impedance Spectroscopy of Aluminum Alloy Anode during Corrosion Process[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(6): 373-376.
- [19] 马景灵, 文九巴. Al-Mg-Sn-Si-In 铝合金在不同溶液中的腐蚀与电化学性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(5): 425-430.
MA Jing-ling, WEN Jiu-ba. Corrosion and Electrochemical Performance of Al-Mg-Sn-SiIn Alloy in Different Solutions[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(5): 425-430.
- [20] 王佳, 曹楚南, 林海潮. 孔蚀发展期的电极阻抗频谱特征[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1989, 9(4): 271-279.
WANG Jia, CAO Chu-nan, LIN Hai-chao. Features of Ac Impedance of Pitting Corroded Electrodes during Pits Propagation[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1989, 9(4): 271-279.
- [21] 李威力. 新型深海铝合金牺牲阳极研制及性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
LI Wei-li. Development and Performance Study of a New Sacrificial Anode for Deep-Sea Aluminum Alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [22] 李威力, 闫永贵, 陈光, 等. Al-Zn-In 系牺牲阳极低温电化学性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(2): 122-124.
LI Wei-li, YAN Yong-gui, CHEN Guang, et al. Electrochemical Behavior of Al-Zn-Ln Sacrificial Anode in Low

- Temperature Environment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(2): 122-124.
- [23] 王海涛, 许实, 王辉, 等. Al-Zn-In-Mg 阳极低温海水环境电化学性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(4): 413-418.
WANG Hai-tao, XU Shi, WANG Hui, et al. Electrochemical Performance of Al-Zn-in-Mg Sacrificial Anode in Cold Seawater[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(4): 413-418.
- [24] 黄燕滨, 宋高伟, 刘学斌, 等. Al-Zn-In-Mg-Ga-Mn 牺牲阳极腐蚀防护行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(1): 44-47.
HUANG Yan-bin, SONG Gao-wei, LIU Xue-bin, et al. Corrosion Protection of Al-Zn-in-Mg-Ga-Mn Aluminous Sacrificial Anode[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(1): 44-47.
- [25] REBOUL M C, GIMENEZ P, RAMEAU J J. A Proposed Activation Mechanism for Al Anodes[J]. Corrosion, 1984, 40(7): 366-371.

责任编辑: 刘世忠