

# 盐度变化对铝牺牲阳极保护效果的影响

刘学庆, 苏文, 赵喜喜, 张守都, 田敬云, 马健, 李友训, 王健

(青岛国家海洋科学研究中心, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 为研究河流入海口处盐度周期变化时铝牺牲阳极对钢结构的保护效果, 测试对比了盐度固定与盐度循环条件下 Q235 钢有无阳极保护时的腐蚀失重和电位变化、铝牺牲阳极的电流效率。结果表明盐度循环会造成 Q235 钢的严重腐蚀, 盐度差越大腐蚀越严重, 甚至可能超过天然海水的腐蚀程度; 在盐度循环条件下铝牺牲阳极对 Q235 钢具有良好的保护效果, 但与稳定的盐度相比, 阳极的消耗量增加、电流效率降低; 在稳定的低盐度条件(0.5%)下, 虽然铝牺牲阳极的电流效率较高, 被保护的 Q235 钢电位足够负, 但是保护效果不理想。本文通过 Q235 钢腐蚀失重数据检验铝牺牲阳极的保护效果, 得到了不同盐度循环条件下铝牺牲阳极的初步性能数据, 为河流入海口处钢结构设施的阴极保护提供了依据。

**关键词:** 铝牺牲阳极; 盐度; 电流效率; 腐蚀失重

中图分类号: TG174.41 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)08-0034-06

DOI: 10.11759/hyxx20201112003

铝牺牲阳极具有电容量大、低消耗率和重量轻等优点, 被广泛应用在海洋工程设施的阴极保护工程中<sup>[1-3]</sup>。为得到更好的腐蚀防护效果, 已进行了许多关于铝牺牲阳极的相关研究, 如研究合金元素对牺牲阳极性能影响<sup>[4-7]</sup>、海水环境因素变化对牺牲阳极性能的影响<sup>[8-10]</sup>、深海中牺牲阳极性能<sup>[11-13]</sup>、特定场合牺牲阳极的应用及其性能分析<sup>[14-16]</sup>等。由于世界范围内, 海水的盐度相对稳定, 保持在 30‰左右, 因此关于海水盐度对牺牲阳极性能影响的研究较少, 仅见到中国科学院海洋研究所张经磊研究员的研究报道<sup>[17]</sup>。该研究发现, 盐度在 10‰以上的海水对铝阳极的各种电学性能无明显影响; 只有海水盐度低于 5‰以后才对铝阳极的各种电学性能产生明显影响, 并使其电学性能低于国家标准的要求。这一研究结论暗示, 在一个相当大的盐度变化范围内(10‰~30‰), 研究盐度对牺牲阳极性能的影响是没有必要的。

但是, 由于我国经济、社会的快速发展, 有时需要在一些河流入海口附近建设钢铁结构设施。在河流入海口附近, 由于淡水与海水混合, 水域的盐度发生变化; 并且由于海洋周期性的涨潮、落潮变化, 造成这种盐度变化是有一定周期性的。这既不同于淡水环境, 也不同于海水环境。使用牺牲阳极能否为处于这种环境中的钢铁设施提供保护, 保护效果如

何, 尚未见到相关研究。本文在实验室中用盐度循环变化模拟入海口处盐度环境, 探讨了盐度循环变化情况下 Q235 钢的腐蚀状况和铝基牺牲阳极的保护效果, 希望为进一步研究河流入海口处钢铁设施的牺牲阳极保护起到借鉴作用。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验使用 Al-Zn-In-Sn 牺牲阳极和 Q235 钢, 阳极化学成分见表 1。Q235 钢化学成分见表 2。

表 1 铝牺牲阳极化学成分(质量分数)

Tab. 1 Chemical composition of Al sacrificial anode

| 元素 | Zn  | In    | Sn    | Si    | Cu       | Fe    | Al |
|----|-----|-------|-------|-------|----------|-------|----|
| 含量 | 5.2 | 0.028 | 0.023 | 0.072 | 0.000 95 | 0.064 | 余量 |

收稿日期: 2020-11-12; 修回日期: 2020-12-02

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2019RZF01001); 山东省软科学研究计划项目(2018RKF01005)

[Foundation: Focus Research Projects of Shandong Province, No. 2019RZF01001; Soft Science Research Project of Shandong Province, No. 2018RKF01005]

作者简介: 刘学庆(1976—), 男, 山东烟台人, 副研究员, 博士, 主要从事海洋腐蚀与防护、海洋科技发展战略等方面的研究, 电话: 0532-66007071, E-mail: liuxueqinghyzx@shandong.cn; 王健(1981—), 通信作者, 男, 山东五莲人, 副研究员, 博士, 主要从事海洋科技与海洋产业研究, 电话: 0532-85815096, E-mail: wangjianhyzx@shandong.cn

表 2 Q235 钢化学成分(质量分数)

| 元素 | C    | S    | P     | Si   | Mn   | Cu   | Fe |
|----|------|------|-------|------|------|------|----|
| 含量 | 0.19 | 0.05 | 0.045 | 0.30 | 0.59 | 0.03 | 余量 |

铝阳极加工成圆柱状( $\Phi 16\text{ mm} \times 48\text{ mm}$ ), 表面光滑度达到 $\nabla 7$ , 中间钻孔(M4 $\times 10\text{ mm}$ )。将阳极试样编号, 先后用丙酮和无水乙醇超声波清洗, 除去表面油污, 擦干, 放入烘箱中在 $(85 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ 加热 2 h 烘干, 放入干燥器自然冷却。24 h 后第一次称重, 数据准确到 0.1 mg。称重后将阳极放入干燥器, 24 h 后再次称重。如此进行, 直至两次称重结果不大于 0.4 mg。将这两次称重结果取平均值, 作为牺牲阳极实验前质量。在阳极中间部位留出工作面积  $14\text{ cm}^2$ , 见图 1。将铜棒紧固在铝阳极一端的螺孔中, 连同铝阳极非工作表面用百得胶密封。

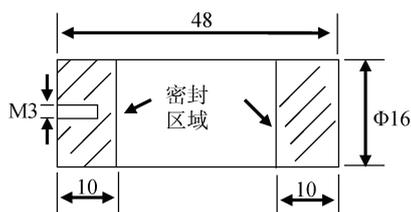


图 1 铝牺牲阳极示意图(单位: mm)

Fig. 1 Schematic of Al sacrificial anode (Unit: mm)

Q235 钢加工成  $50\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  的规格, 在其中一端的中间钻直径 3 mm 的小孔, 小孔圆心距长边 12.5 mm, 距短边 5 mm。Q235 钢在有孔端打印编号, 用丙酮、无水乙醇清洗、除油, 干燥后称重, 方法同铝牺牲阳极。用导线穿过 Q235 钢的小孔并绕紧, 保持导线和 Q235 钢良好的电连接。密封 Q235 钢有孔的一端, 从边缘起密封 10 mm, 同时将导线暴露在外面的部分也密封起来。Q235 钢试样如图 2 所示。

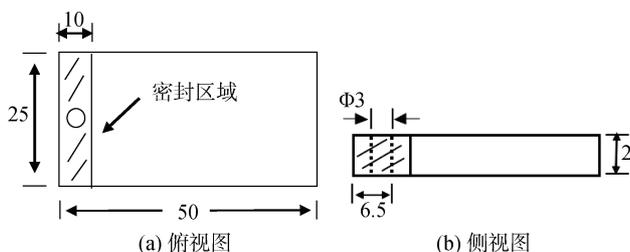


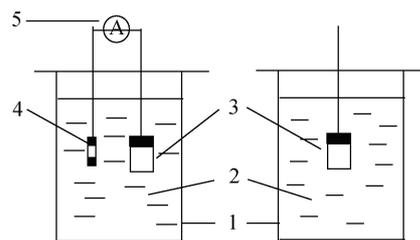
图 2 Q235 钢试样示意图(单位: mm)

Fig. 2 Schematic of Q235 steel sample (Unit: mm)

## 1.2 实验步骤

实验用海水取自青岛海滨, 盐度 3.1%。向天然

海水中添加蒸馏水配制不同盐度的海水, 实验使用盐度分别为: 0%(蒸馏水), 0.5%, 1.6%, 3.1%(天然海水)。实验分为盐度固定、盐度循环两大类。固定的盐度分别为 0%(蒸馏水)、0.5%、1.6%、3.1%; 循环改变的盐度分别为 3.1%~1.6%盐度循环; 3.1%~0.5%盐度循环; 3.1%~0%盐度循环。每类盐度都分别进行 Q235 钢被铝牺牲阳极保护和未被保护的实验(对照组)。实验装置如图 3 所示。铝牺牲阳极的工作电流由 DL-1 型多通道电偶腐蚀测试仪监测, 每 10 min 记录一次数据。腐蚀测试仪的测量精度是  $0.1\text{ }\mu\text{A}$ , 测量量程为  $1\text{ }\mu\text{A} \sim 20\text{ mA}$ 。实验时间为 240 h。盐度循环实验总计 5 个循环周期, 每个循环周期为 48 h: 第一个 24 h 盐度为 3.1%, 接下来 24 h 为其他盐度(下文分别用“3.1%~1.6%”、“3.1%~0.5%”、“3.1%~0%”表示)。每个盐度进行 3 组平行实验。Q235 钢的电位用饱和甘汞电极测试, 试样浸入水中 1 h 后第一次测试电位, 此后每 24 h 测试一次电位。



(a) 受牺牲阳极保护 (b) 自然腐蚀(未被保护)

图 3 Q235 钢受铝牺牲阳极保护(a)与自然腐蚀实验(b)示意图

Fig. 3 Schematic of Q235 steel (a) with Al anode protection and (b) without protection

注: 1. 容器; 2. 不同盐度的海水; 3. Q235 钢; 4. 铝牺牲阳极; 5. 电流记录仪

实验结束后, 断开 Q235 钢试样和铝牺牲阳极的连接。将 Q235 钢用 100 mL 浓盐酸(HCl 含量: 36%~38%)、4 g 六次甲基四胺、100 mL 蒸馏水配置的清洗液清洗 10 min, 取出, 用蒸馏水、无水乙醇冲洗, 擦干, 放入烘箱在  $85\text{ }^\circ\text{C}$  烘干 2 h, 取出放入干燥器。用 1.1 的方法称重。将铝牺牲阳极浸入 68% 的浓硝酸清洗 10 min, 然后用蒸馏水、无水乙醇冲洗, 擦干, 放入烘箱在  $85\text{ }^\circ\text{C}$  烘干 2 h, 取出放入干燥器。用 1.1 的方法称重。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Q235 钢的电位

不同盐度下, 无牺牲阳极保护的 Q235 钢的自然

腐蚀电位列于表 3。不同盐度下, 被铝牺牲阳极保护的 Q235 钢的电位示于图 4。

表 3 240 h 无牺牲阳极保护的 Q235 钢在不同盐度下的平均电位(V, 相对于饱和甘汞电极)

Tab. 3 Average potential of Q235 steel without Al anode protection after 240 h (V, vs. SCE)

| 盐度 | 0%     | 0.5%   | 1.6%   | 3.1%   | 3.1%~1.6% | 3.1%~0.5% | 3.1%~0% |
|----|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|---------|
| 电位 | -0.724 | -0.746 | -0.751 | -0.740 | -0.740    | -0.745    | -0.742  |

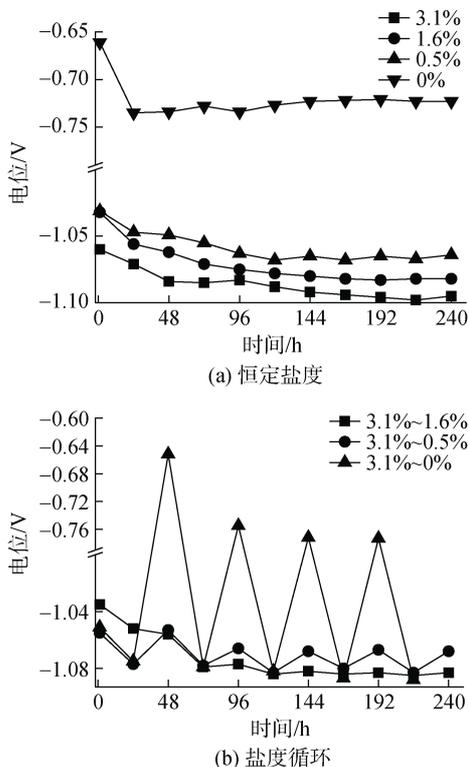


图 4 不同盐度海水中 Q235 钢在铝阳极保护下的电位(V, 相对于饱和甘汞电极)

Fig. 4 Protection potential of Q235 steel at different salinities (V, vs. SCE)

Q235 钢在蒸馏水中自然状态的电位大约-0.724 V, 连接铝阳极后的电位-0.73 V, 两者几乎相同。说明铝牺牲阳极在蒸馏水中对 Q235 钢起不到保护作用。这是因为在蒸馏水中, 导电离子很少, 铝牺牲阳极与 Q235 钢之间的离子导电通路的电阻极大, 使得 Q235 钢很难被阴极极化, 因而得不到保护。

含盐溶液可以有效构成铝牺牲阳极和 Q235 钢之间的离子导电通路, 但是不同盐度溶液中含  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  的浓度不同, 随着钙镁离子含量的升高, Q235 钢阴极极化更容易在表面形成沉积层, 使其阴极反应程度更大, 得到更好的保护。如图 4a 所示, 得到铝牺牲阳极保护的 Q235 钢的电位在 0.5%、1.6%和 3.1%的盐度下均负于-1.05 V, 而且随着盐度的增加,

Q235 钢的电位出现负移的趋势。这说明在以上盐度的海水中, 铝牺牲阳极可以对 Q235 钢起到保护作用, 而且盐度越高, 保护效果越好。

发生盐度循环时, Q235 钢在高盐度(3.1%)时有利于形成钙镁沉积层, 得到较好的保护; 随着盐度的降低, 钙镁离子浓度变小, 沉积层越来越不易形成, 保护效果越来越低。表现在图 4b 中, 循环周期中盐度差越大, Q235 钢的电位起伏越大。值得注意的是, 对比盐度循环实验中 3.1%盐度与盐度固定试验中的 3.1%盐度条件下 Q235 钢的电位, 可以发现, 循环实验中的电位偏正一些; 与之相反, 循环实验中的较低盐度下(1.6%、0.5%、0%)Q235 钢的电位偏负一些。说明循环周期内的低盐度(1.6%、0.5%、0%)阻碍了钙镁沉积层的正常形成, 造成铝牺牲阳极的保护作用比在固定的高盐度环境(3.1%)中要低; 与之相反, 循环周期内的高盐度(3.1%)有助于钙镁沉积层的形成, 使得铝阳极的保护作用比在固定的低盐度环境(1.6%、0.5%、0%)中要高。

## 2.2 铝牺牲阳极的电流效率和保护效率

铝阳极和 Q235 钢的腐蚀失重见图 5。根据记录的牺牲阳极放电电流及放电时间, 计算得到实验期间不同盐度下牺牲阳极实际保护电量, 示于图 6。

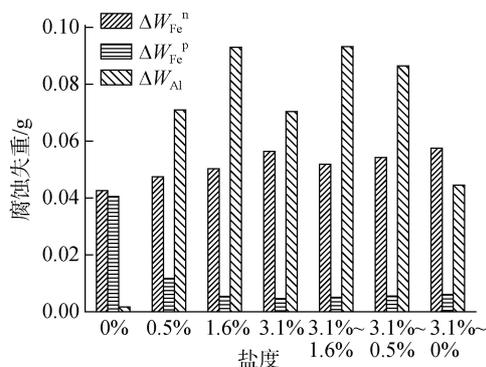


图 5 实验前后 Q235 钢及铝牺牲阳极腐蚀失重

Fig. 5 Weight loss of Q235 steel and Al sacrificial anode  
注:  $\Delta W_{Fe}^n$ : 自然腐蚀情况下 Q235 钢的腐蚀失重;  $\Delta W_{Fe}^p$ : 铝牺牲阳极保护下 Q235 钢的腐蚀失重;  $\Delta W_{Al}$ : 铝牺牲阳极的腐蚀失重

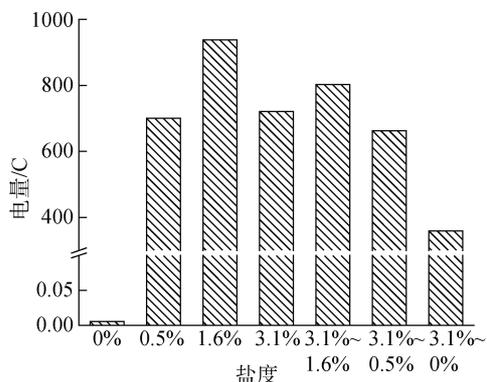


图 6 实验期间铝牺牲阳极保护电量  
Fig. 6 Electric charge quantity of Al sacrificial anode

铝牺牲阳极的作用是保护钢铁免于腐蚀, 因此我们通过对比钢在有牺牲阳极保护时的腐蚀失重与自然状态下的腐蚀失重可以了解该牺牲阳极的保护效果。为了量化保护效果, 可以两者腐蚀失重之差占自然状态下钢铁腐蚀失重的百分比作为牺牲阳极的保护效率, 根据公式(1)计算。可以看出, 两者之差越大, 说明钢铁在被保护时的腐蚀失重越小, 保护效率越高, 阳极的保护效果越好。

$$Fe\% = \frac{(\Delta W_{Fe}^n - \Delta W_{Fe}^p)}{\Delta W_{Fe}^n} \times 100\%, \quad (1)$$

公式(1)中, Fe%表示铝阳极的保护效率;  $\Delta W_{Fe}^n$ 表示自然腐蚀情况下 Q235 钢的腐蚀失重;  $\Delta W_{Fe}^p$ 表示铝牺牲阳极保护下 Q235 钢的腐蚀失重。

铝牺牲阳极的电流效率根据公式(2)计算。牺牲阳极溶解放出的电量并不是完全用于保护钢铁, 部分电量在牺牲阳极内部的自腐蚀中被消耗了。牺牲阳极的电流效率是牺牲阳极放出的用于保护钢铁的电量占牺牲阳极溶解放出的总电量的百分比。电流效率越高, 说明阳极可以用于保护钢铁的电量越多, 即相同质量的阳极可以保护钢铁更长时间。

$$Al\% = \frac{\sum I \cdot t}{\Delta W_{Al} (m_{Al}\% \cdot Q_{Al} + m_{Zn}\% \cdot Q_{Zn})} \times 100\%, \quad (2)$$

公式(2)中, Al%表示铝阳极的电流效率;  $I$ 表示铝阳极释放的保护电流;  $t$ 表示放电时间;  $\Delta W_{Al}$ 表示铝阳极的腐蚀失重;  $m_{Al}\%$ 表示铝阳极中铝元素的质量含量;  $Q_{Al}$ 表示铝的理论电容量;  $m_{Zn}\%$ 表示铝阳极中锌元素的质量含量;  $Q_{Zn}$ 表示锌的理论电容量。

铝牺牲阳极保护效率和电流效率的计算结果示于图 7。

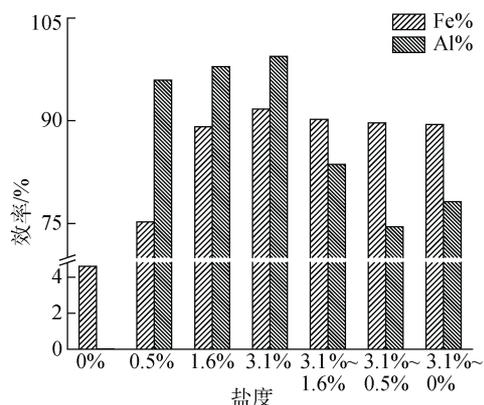


图 7 铝牺牲阳极的保护效率和电流效率  
Fig. 7 Protection and current efficiencies of Al sacrificial anode

注: Fe%: 铝牺牲阳极的保护效率; Al%: 铝牺牲阳极的电流效率

在蒸馏水(0%盐度)中, Q235 钢有牺牲阳极保护与无牺牲阳极保护时的腐蚀失重很接近, 同时铝牺牲阳极的失重很小(如图 5 所示), 图 6 所示牺牲阳极释放的保护电量极低, 图 7 所示牺牲阳极电流效率接近 0, 这些结果一致说明铝阳极几乎没有提供保护作用。这与图 4a 中 Q235 钢连接阳极时的电位很快稳定并与无阳极保护时电位差别不大是相互吻合的。

在盐度稳定的情况下, 随盐度的升高(从 0.5%到 3.1%), 溶液中  $Cl^-$ 含量增大, 对 Q235 钢表面膜破坏程度加大, Q235 钢的自然腐蚀速度变快(图 5)。此时施加阴极保护, 随溶液中  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 离子含量增加, Q235 钢表面更易于形成钙镁沉积层, 因而保护效果越来越好(图 7)。盐度为 0.5%时, Q235 钢电位负于  $-1.05$  V(图 4a), 而且铝阳极的电流效率超过 95%(图 7), 但是对 Q235 钢的保护效率仅在 75%左右(图 7), 说明仅凭被保护钢材的电位或牺牲阳极的电流效率来判断保护效果是有问题的。这个现象的产生原因可能是盐度 0.5%的溶液中  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 含量过低, Q235 钢虽然被阴极极化, 但是钙镁沉积层难以形成, 因而铝牺牲阳极不能提供足够的保护。具体原因需要结合微观形貌进一步研究。

由图 5 可见, 在盐度循环的条件下, 随盐度差增加, Q235 钢的自然腐蚀速度增大。原因可能是 Q235 钢首先在 3.1%盐度的海水中被破坏了表面膜, 暴露出钢本体, 当外部溶液盐度降低时, 由于溶液中的氧含量随盐度降低而升高, 使得 Q235 钢阴极反应随盐度降低而加快, 造成了腐蚀速度增大。施加阴极保护后, Q235 钢的腐蚀失重明显降低(图 5), 保护效率在 90%左右(图 7), 说明铝牺牲阳极可以为处于盐度循

环条件下的 Q235 钢提供良好的防护。但是铝牺牲阳极的消耗量增大(图 5), 而且电流效率明显下降(图 7), 如固定的 3.1%、1.6%盐度下铝阳极的电流效率都大于 95%, 但是 3.1%~1.6%循环盐度下铝阳极的电流效率不到 85%。电流效率降低说明铝牺牲阳极内部的自放电增强, 原因可能是铝阳极在盐度循环中的高盐度时表面吸附了一层 3.1%盐度的薄水层, 当外部溶液盐度降低时, 与铝阳极和 Q235 钢之间的较低盐度、较低电导率相比, 铝阳极表面 3.1%盐度的薄水层提供了更高的电导率, 使铝阳极本身的自腐蚀更容易发生。明确详细的作用机理, 还需要进一步的研究。

### 3 结论

无论盐度固定还是盐度循环, 铝牺牲阳极都可以为 Q235 钢提供防护。在稳定的低盐度环境(0.5%)中, 铝牺牲阳极的电流效率较高, 被保护的 Q235 钢电位足够负, 但是与天然海水的被保护 Q235 钢相比, 防护效果并不理想。因此在稳定的低盐环境中, 不能仅根据钢材的电位和牺牲阳极的电流效率判断保护效果。在盐度循环条件下 Q235 钢发生严重腐蚀, 盐度差相差越大, 腐蚀越严重, 甚至可能超过天然海水中的腐蚀程度。此时铝基牺牲阳极的保护效果接近天然海水中的效果, 但是阳极的消耗量增大、电流效率下降, 具体的原因及机理需要进一步研究。有必要研究开发新型阳极材料或腐蚀防护技术, 以保护处于河流入海口处的钢结构设施。

#### 参考文献:

- [1] 魏宝明. 金属腐蚀理论及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 241-245.  
WEI Baoming. Theory of metal corrosion and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 241-245.
- [2] 王树森, 梁成浩, 黄乃宝, 等. 铝基牺牲阳极研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(5): 369-375.  
WANG Shusen, LIANG Chenghao, HUANG Naibao, et al. Research progress of aluminum based sacrificial anode[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2011, 23(5): 369-375.
- [3] 黄海滨, 宋高伟, 刘学斌, 等. 海洋环境 Al-Zn-In-Mg-Ti 牺牲阳极腐蚀防护研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 46-48.  
HUANG Haibin, SONG Gaowei, LIU Xuebin, et al. Research on corrosion protection of Al-Zn-In-Mg-Ti sacrificial anode materials in sea environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 46-48.
- [4] SHIBLI S, JABEERA B, MANU B. Development of high performance aluminium alloy sacrificial anodes reinforced with metal oxides[J]. Materials Letters, 2007, 61(14/15): 3000-3004.
- [5] SINA H, EMAMY M, SAREMI M, et al. The influence of Ti and Zr on electrochemical properties of aluminum sacrificial anodes[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 431(1/2): 263-276.
- [6] 胡崇巍, 张海兵, 郭建章, 等. 不同 Sn 含量对 Al-Zn-Ga-Si-Sn 阳极性能的影响[J]. 材料保护, 2019, 52(4): 73-77.  
HU Chongwei, ZHANG Haibing, GUO Jianzhang, et al. Effect of Sn content on the electrochemical performance of Al-Zn-Ga-Si-Sn alloy anode[J]. Materials Protection, 2019, 52(4): 73-77.
- [7] SADAWY M, SAAD S, KARIM A R. Effect of Zn/Mg ratio on cathodic protection of carbon steel using Al-Zn-Mg sacrificial anodes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(8): 2067-2078.
- [8] 肖泽润, 游革新, 刘均泉. 温度和 pH 对 Al-Zn 牺牲阳极在某生产水中电化学腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(9): 836-845.  
XIAO Zerun, YOU Gexin, LIU Junquan. Effect of temperature and pH on electrochemical corrosion of Al-Zn sacrificial anode in production water[J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(9): 836-845.
- [9] 黄振凤, 郭建章, 刘广义, 等. 海水干湿交替环境对铝合金牺牲阳极性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(2): 160-164.  
HUANG Zhenfeng, GUO Jianzhang, LIU Guangyi, et al. Effect of wet-dry cycling on performance of aluminum alloy sacrificial anodes in seawater[J]. Corrosion and Protection, 2016, 37(2): 160-164.
- [10] 孔小东, 陈学群, 常万顺, 等. 干湿交替条件下牺牲阳极保护效果分析[J]. 材料保护, 1998, 31(12): 25-26.  
KONG Xiaodong, CHEN Xuequn, CHANG Wanshun, et al. Effectiveness analysis of sacrificial anode protecting under alternative dry-wet conditions[J]. Materials Protection, 1998, 31(12): 25-26.
- [11] 张国庆, 钱思成, 张海兵, 等. 铝合金牺牲阳极深海应用性能研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 33-37.  
ZHANG Guoqing, QIAN Sicheng, ZHANG Haibing, et al. Performance of aluminium sacrificial anodes in deep sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(4): 33-37.
- [12] 张国庆, 钱思成, 张有慧, 等. 深海低温高压条件下铝合金牺牲阳极电化学性能研究[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(3): 23-29, 89.  
ZHANG Guoqing, QIAN Sicheng, ZHANG Youhui, et al. Study on electrochemical properties of aluminum alloy sacrificial anodes under the conditions of low

- temperature and high pressure in the deep sea[J]. *Total Corrosion Control*, 2019, 33(3): 23-29, 89.
- [13] 贾红刚. 模拟深海环境对铝基牺牲阳极电化学性能的影响研究[J]. *现代制造技术与装备*, 2014(4): 24-25.  
JIA Honggang. Effects of simulated deep sea environment electro-chemical properties on aluminum alloy sacrificial anode[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2014(4): 24-25.
- [14] 周李军, 李庆华, 付国庆, 等. 某风电场海上钢结构基础牺牲阳极保护电位评估[J]. *全面腐蚀控制*, 2019, 33(10): 39-43.  
ZHOU Lijun, LI Qinghua, FU Guoqing, et al. Evaluation of sacrificial anode protection potential for offshore steel structure foundation in a wind farm[J]. *Total Corrosion Control*, 2019, 33(10): 39-43.
- [15] 廖宏越, 蔡德纯, 蒋满军, 等. FPSO 工艺水舱阳极快速消耗原因分析[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(4): 132-135.  
LIAO Hongyue, CAI Dechun, JIANG Manjun, et al. Reasons for rapid consumption of anodes in process water tank of FPSO[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(4): 132-135.
- [16] 马士德, 赵生俊, 刘欣, 等. Al 基牺牲阳极的生物污损——“阳极苞”的解析[J]. *海洋科学*, 2018, 42(10): 16-22.  
MA Shide, ZHAO Shengjun, LIU Xin, et al. Biofouling of Al based sacrificial anode—analysis of “anode bract”[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(10): 16-22.
- [17] 张经磊, 李红玲, 谢肖勃, 等. 海水盐度对铝阳极电化学性能影响的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(3): 281-284.  
ZHANG Jinglei, LI Hongling, XIE Xiaobo, et al. Effect of seawater salinity on the electrochemical performance of Al sacrificial anodes. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(3): 281-284.

## Effect of salinity variation on the protective performance of Al sacrificial anode

LIU Xue-qing, SU Wen, ZHAO Xi-xi, ZHANG Shou-du, TIAN Jing-yun, MA Jian, LI You-xun, WANG Jian

(Qingdao National Oceanographic Center, Qingdao 266071, China)

**Received:** Nov. 12, 2020

**Key words:** Al sacrificial anode; salinity; current efficiency; weight loss

**Abstract:** To assess the performance of Al sacrificial anode in protecting steel structures under the condition of periodic salinity variation near estuaries, some factors, including the weight loss and potential of Q235 steel with and without the protection of Al sacrificial anode and the current efficiency of Al anode, were tested under the conditions of fixed and periodic salinities. The results showed that periodic salinity caused corrosion of Q235 steel and different salinities caused more severe corrosion than in natural seawater. The Al sacrificial anode exhibited a good protective performance on Q235 steel under the condition of periodic salinity but led to additional consumption and decreasing the current efficiency of the Al anode. Under the fixed low salinity of 0.5‰, the Al sacrificial anode did not exhibit a good protective performance as expected even though its current efficiency was high and the potential of protected Q235 steel was sufficiently negative. This study tests the protective performance of the Al sacrificial anode based on the weight loss of Q235 steel and obtains the initial performance data of the Al anode under different periodic salinities. It also provides a reference for the cathodic protection of steel structures near estuaries. Thus, new anode materials or corrosion prevention techniques to protect steel structures near estuaries need to be developed.

(本文编辑: 杨 悦)