

# 铝合金牺牲阳极材料的研究进展

孙明先, 马力, 张海兵, 闫永贵, 刘少通

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

**摘要:** 论述了铝合金牺牲阳极材料的发展历程, 阐述了适用于不同环境的铝合金牺牲阳极研发情况, 综述了铝合金牺牲阳极的几种活化溶解理论, 对影响阳极电化学性能的因素进行了探讨, 分析了铝合金牺牲阳极材料技术目前存在的问题, 并展望了铝合金牺牲阳极未来的发展方向。常规海水环境的牺牲阳极材料已发展得较为成熟, 特殊工况环境的牺牲阳极尚有待进一步开发和完善。

**关键词:** 牺牲阳极; 铝合金; 电化学性能; 活化机理

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.03.002

**中图分类号:** TJ04

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)03-0009-05

## Research Progress in Aluminum Alloy Sacrificial Anode Materials

SUN Ming-xian, MA Li, ZHANG Hai-bing, YAN Yong-gui, LIU Shao-tong

(State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266237, China)

**ABSTRACT:** The development history of the aluminum alloy sacrificial anode materials was discussed. This critical review outlined the research development of the aluminum alloy sacrificial anodes utilized in different environments, and reviewed the mechanism of their activation dissolution, and analyzed factor affecting electrochemical property of anode. The existing problems of aluminum alloy sacrificial anode technique were pointed out. And the trend of development of the aluminum alloy sacrificial anode materials was discussed. The anode materials under ordinary sea water conditions is highly developed while those under special working situations still require further development and improvement.

**KEY WORDS:** sacrificial anode; aluminum alloy; electrochemical property; activation mechanism

海洋环境是苛刻的腐蚀环境, 海洋构筑物在服役过程中不可避免会遭受海水腐蚀。腐蚀不仅会缩短海洋构筑物的服役寿命, 造成显著的经济损失, 还直接影响其安全性和可靠性, 甚至引发突发性事故, 导致人员伤亡, 威胁环境和生态。牺牲阳极阴极保护法是海洋构筑物常用的腐蚀防护方法, 具有简单可靠、成本低、免维护等优点, 其保护效果和牺牲阳极材料密切相关。

目前发展较为成熟的牺牲阳极材料主要分为四大类, 包括镁合金、锌合金、铝合金及铁合金。上述不同材料的阳极适用于不同的服役环境, 其中镁合金

阳极主要应用于土壤和淡水环境, 锌合金阳极和铝合金阳极应用于海水环境, 铁合金阳极主要是针对铜合金海水管路的防腐需求研发的, 目前已广泛应用于海军舰船海水管路系统的腐蚀防护中。铝阳极由于密度低、电容量大、原料易得等优势, 在海洋构筑物的防腐领域得到广泛应用, 取得了良好的保护效果。

目前海洋开发事业发展迅速, 我国已建成和正在兴建的海上平台、港工码头、海底管道等基础设施众多, 这些设施常采用铝合金牺牲阳极进行腐蚀控制, 年需求量巨大。如海上平台导管架桥墩保护用的阳极质量达 500 kg/支, 一座平台用量可达 500 多支, 需

收稿日期: 2017-10-14; 修订日期: 2017-12-14

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目(浮式保障平台工程(二期))

作者简介: 孙明先(1964—), 男, 山东烟台人, 研究员, 主要研究方向为海洋腐蚀与防护。

量近 300 t。海上大桥的钢桩阴极保护所需铝合金牺牲阳极数量也非常可观,如东海大桥使用的阳极达 2000 多支,质量达几千吨。我国每年出口的阳极数量近万吨,按 2.5 万元/t 计,可获得上亿的产值。因此,铝合金牺牲阳极具有极大的市场需求。近年来,随着深海资源的开发和北极航道的开通,以及海洋工程装备轻量化发展,对牺牲阳极材料提出了新的要求。文中概述了铝合金牺牲阳极材料的发展过程,综述了铝阳极的活化溶解机理,并分析了影响阳极工作性能的合金成分及杂质元素,指出了铝合金牺牲阳极材料技术目前存在的问题,以期铝合金牺牲阳极材料的发展提供参考。

## 1 铝合金牺牲阳极材料的发展

纯铝因表面易产生致密的氧化膜而使得其电极电位较正,不能作为牺牲阳极材料使用<sup>[1]</sup>。需要通过添加微量元素进行合金化,限制或阻止铝表面形成连续致密的氧化膜,使得铝合金持续活化溶解,实现对被保护结构的保护作用<sup>[2-3]</sup>。20 世纪 60 年代, J.T.Reding 等系统研究了元素周期表中大部分元素对铝合金电极电位的影响<sup>[4]</sup>,为铝阳极后续开发工作提供了重要的基础数据。

铝合金牺牲阳极由基本的二元合金开始发展,但由于二元合金电流效率偏低,不能满足实际应用的需要,于是在铝合金中再加入 Hg, In, Sn, Mg 等元素提升其组分数量,通过其结构和性质的改变使阳极的性能持续获得改进和提升。由此开发出多种新型材料,其中电位能够稳定处于工作要求区间且具有高电流效率的有 Al-Zn-Hg, Al-Zn-Sn, Al-Zn-In 系合金。Al-Zn-Hg 系阳极电流效率高,溶解均匀,但因环保问题,该系阳极已被大多数国家和组织禁止使用<sup>[5]</sup>。Al-Zn-Sn 系阳极长期工作性能不佳,且须进行热处理,使得熔炼成本升高,因此也逐渐被淘汰。目前海洋环境应用最为广泛的是 Al-Zn-In 系合金阳极<sup>[6-9]</sup>。为了进一步提升阳极性能,在 Al-Zn-In 合金的基础上,不断调整合金元素的种类以及添加比例,形成了一系列的牺牲阳极材料。铝阳极的发展大致经历了三个阶段,由常规铝阳极到高效铝阳极,再到近期针对特殊工作环境而研发的新型牺牲阳极。

常规铝阳极是指电容量 $\geq 2400$  A·h/kg 的阳极材料,主要有 Al-Zn-In, Al-Zn-In-Cd, Al-Zn-In-Si, Al-Zn-In-Sn, Al-Zn-In-Sn-Mg 等<sup>[10-13]</sup>。为更好地优化阳极性能,获得更长的服役期限,在原有基础上研发了电容量提升至超过 2600 A·h/kg 的高效铝阳极,目前已发展有 Al-Zn-In-Mg-Ti, Al-Zn-In-Mg-Ga-Mn 等。上述阳极在全浸海水环境中均表现出极佳的工作性能。含 Cd 阳极因环保问题已基本被淘汰,含 Sn 阳

极通常需要进行热处理,应用也相对较少。Al-Zn-In-Si 阳极适合工作于海泥环境,主要针对海底管线的腐蚀防护。海洋工程中应用最为广泛的则是 Al-Zn-In 系阳极和 Al-Zn-In-Mg-Ti 高效阳极。

近年来,主要是针对干湿交替环境、深海环境、淡水环境等特殊环境,或对易氢脆等有特殊需求的材料发展了一系列特种阳极。

1) 干湿交替环境高活化牺牲阳极。干湿交替环境主要指潜艇上层建筑或位于海洋潮汐带的钢构件等,因服役需求或潮位涨落而处于干湿交替的状态,结构表面因介质盐浓度的增加以及溶解氧的充分扩散腐蚀更为苛刻。常规阳极在这种干湿交替环境中,腐蚀产物不容易脱落,而是结壳粘附于表面,阻碍了阳极继续活化溶解,致使阳极提前失效。为解决上述问题,中国船舶重工集团公司第七二五研究所通过加入 Mg, Ga, Mn 等活化元素,开发了高活化牺牲阳极材料<sup>[14-16]</sup>,目前已形成企业标准。该阳极在干湿交替条件下表现出良好的活化性能,从干态浸入水中后,可快速活化溶解,在 1:1 的干湿交替条件下工作电位为 -1.10 V,电流效率大于 85%,腐蚀产物易脱落,目前已在我国海军舰船中得到了广泛应用。

2) 淡水环境高负电位牺牲阳极。淡水主要是指江河入海口附近电阻较高的环境,因其氯离子含量低,要求阳极活性较强。通过添加 Zn, In, Sn, Mn, Bi 等合金元素,研制了高负电位铝合金牺牲阳极。该阳极工作电位负于 -1.40 V(vs.SCE),实际电容量 $\geq 2175$  A·h/kg,表面活性高,溶解均匀,可用于江河入海口的港工设施的腐蚀防护<sup>[17-18]</sup>。

3) 深海牺牲阳极。深海具有高压、低温、低溶解氧等特点,材料腐蚀行为与水面环境不同。常规的牺牲阳极在深海环境中局部腐蚀溶解严重,电流效率大幅度降低,无法对深海设施提供持续有效保护<sup>[19]</sup>。针对深海环境特点,在 Al-Zn-In 三元合金的基础上,通过添加 Mg, Ti, Ga, Mn 等合金元素,利用合金元素间的复合活化作用,获得其在深海中的高活化性能,研制出深海铝合金牺牲阳极材料<sup>[20]</sup>。该阳极在模拟 600 m 深海环境中的工作电位为 -1.05~-1.15 V,电流效率大于 90%,溶解性能良好,可用于深海环境各类金属构件的腐蚀防护<sup>[21]</sup>。

4) 低电位牺牲阳极。在铝合金牺牲阳极的发展历程中,无论是从阳极成分上还是热处理工艺上,人们一直在致力于开发开路电位和工作电位均比较负(负于 -1.05 V),电流效率高的铝合金牺牲阳极。直到 20 世纪 80 年代,美国海军实验室证实 UNS G43406 高强钢失效是由阴极保护引起的氢脆造成的,由此引发了人们对传统牺牲阳极材料可能导致高强钢氢脆这一问题的重视,进而推动了低驱动电位牺牲阳极的开发。1996 年,美法海军率先开展研究,以 Ga 为活

化元素开发了 AG 系列的低驱动电位牺牲阳极, 工作电位为  $-700 \sim -870$  mV。2002 年, 美国海军试验室对该阳极进行了长时间的实海性能研究。尽管其保护电位能够满足高强钢的防护需求, 但无法有效溶解, 局部腐蚀溶解严重。中国船舶重工集团公司第七二五研究所在 Al-Ga 二元合金的基础上, 通过引入硅和锌, 改善了牺牲阳极的溶解能力, 开发出电位处于要求范围、溶解相对均匀、电流效率高的低电位牺牲阳极材料, 已在高强钢、不锈钢及钛合金等氢脆敏感材料的腐蚀防护中得到应用<sup>[22-23]</sup>。

## 2 铝合金牺牲阳极活化机理

为获得性能优异的铝合金牺牲阳极材料, 自铝合金牺牲阳极诞生之日起, 人们就在致力于探清铝合金牺牲阳极的活化溶解机理。因此在研究合金元素对铝的活化作用的基础上, 形成了不同的理论, 可分别解释不同元素的活化作用机理, 但至今未有统一论, 主要有以下几种理论。

1) 溶解-再沉积机理。该理论是在研究 Al-Zn-Hg 系合金溶解过程中, 利用电化学方法和显微组织观察, 得出的被较为普遍接受的活化理论<sup>[24]</sup>。活化过程分以下三步。

第一步: 铝及固溶体中的其他金属组分被氧化生成阳离子 (M 代表 Zn, Sn, Ga, In, Hg 等元素),  $\text{Al}(\text{M}) \rightarrow \text{Al}^{3+} + \text{M}^{n+} + (n+3)\text{e}$ 。

第二步: 合金金属离子电势比铝高, 因而发生离子交换反应:  $3\text{M}^{n+} + n\text{Al} \rightarrow n\text{Al}^{3+} + 3\text{M}$ 。

第三步: 阴极性阳离子  $\text{M}^{n+}$  回沉, 铝氧化膜部分脱落, 合金电位负移, 阳极溶解得以继续进行 (与第二步同时进行)。

这种理论能够较好地解释为何腐蚀从活化点开始扩展。该理论认为只有固溶于铝基体的合金元素才能起到活化作用。另外, 该机理是一种自催化机理, 无法有效说明导致铝阳极电流效率降低的因素。

2) 第二相优先脱落。对 Al-Zn-In 阳极进行电子探针观察, 发现掺杂有 In, Si, Fe, Cu 的第二相分布于合金结构中。溶解过程中, 该相因活性最强而优先溶解, 此时铝基体暴露于介质中, 与表层氧化膜组成电位差较大的局部阴阳极, 导致铝元素氧化脱落。当铝与外界直接接触后, 取代富铜相成为阳极相, 之前溶解的  $\text{In}^{3+}$  被还原回到合金表面。这一过程导致基体大量溶解, 其中包含的部分富铜相未发生电子交换就耗散到环境中, 造成电流效率降低<sup>[14]</sup>。

3) 非常价态机理。非常价态理论即分步溶解理论, Al 的稳定价态为 +3 价, 溶解过程中, 3 个活泼电子很难同时脱离, 而是分步失去的, 可能首先失去最活泼的一个电子, 然后再失去两个。该理论还有待

后续研究来完善发展<sup>[25]</sup>。

4) 表观固溶度机理。该理论是基于合金元素 In 与杂质元素相互作用的基础上提出的, 其前提是合金中含有杂质。研究者认为合金元素的表观固溶度就是合金元素含量加上与杂质作用的量, 当合金元素含量小于它的表观固溶度时, 回沉的合金元素量不足以抵消回沉的杂质影响, 故电位不够负。当合金元素量在表观固溶度以上时, 情况则相反。

5) 表面自由能理论。该理论认为, 合金的表面自由能越低, 内部金属与表面氧化膜的作用力越小, 因此也就越有利于合金的均匀溶解。印度学者通过对采用 In, Sn 活化的铝合金阳极的电化学性能与其表面自由能之间的关系开展研究, 提出并验证了表面自由能理论<sup>[26]</sup>。

## 3 铝合金牺牲阳极性能影响因素

由于纯铝的钝化性, 需要引入其他微量元素, 才能破坏其钝化膜的连续性, 使其可以持续溶解, 从而发挥牺牲阳极的功效。影响阳极性能的因素主要是化学成分, 热处理工艺也有一定影响。常用的活化元素有 Zn, In, Sn, Cd, Si, Mg 等, 不同的活化元素对铝所起的活化作用不尽相同。

### 3.1 合金元素

1) Zn 是制备铝合金牺牲阳极的最主要合金组分, 它可使铝阳极易合金化, 增加各组分的均匀程度, 腐蚀产物易脱落, 使合金电位降低  $0.1 \sim 0.3$  V。Zn 的存在促进了  $\text{ZnAlO}_4$  的产生, 增加了氧化膜的缺陷, 并可和其他合金元素共同作用, 降低氧化膜的稳定性。

2) In 可改善铝的活性, 使其电位负移, 使合金电位降低  $0.4$  V 左右。原因是组分中的 In 可改变表面吸附  $\text{Cl}^-$  的电位, 使得  $\text{Cl}^-$  更容易吸附在阳极表面, 破坏表面钝化膜。In 的添加比例需要控制在  $0.02\% \sim 0.03\%$ 。In 含量过低不能充分起到活化作用, 过高则会形成偏析相, 加剧阳极的自腐蚀, 降低电流效率。

3) Sn 可降低铝表面钝化膜电阻, 使铝表面钝化膜产生孔隙, 破坏其连续致密性<sup>[27]</sup>。单独添加 Sn 的合金的腐蚀产物不易脱落, 导致溶解不均匀。因此, Sn 一般作为 Al-Zn-In 的第四组元加入, 和 Zn, In 具有协同效应, 可与 In 形成固溶体, 使得铝合金晶粒细化, 减少晶间偏析相, 提高 Al-Zn-In-Sn 合金活化性能的稳定性, 阳极溶解更均匀。含 Sn 的阳极熔炼工艺较为复杂, 需进行均质化热处理, 以弥补 Fe 杂质带来的不利影响, 造成生产成本提高。

4) Mg 可以改变合金的微观结构, 从而改善阳极

的电化学性能,使溶解更加均匀,并提升极化能力。Mg在Al中除少量以固溶形式存在外,多表现为化合物状态,例如 $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ ,  $\text{MgZn}_2$ 等。它们相对基体电位较负,易成为点蚀核诱发点蚀。过量的Mg易与Al反应生成阳极性中间产物 $\text{Mg}_2\text{Al}_3$ ,破坏晶格结构导致晶间腐蚀,使得阳极电流效率降低。另外,过量的Mg也会导致阳极的铸造性能降低。

5) Ti具有细化晶粒的作用,添加Ti后,可迅速和Al形成高熔点的 $\text{TiAl}_3$ ,在合金的冷却过程中,作为晶核起到组织细化的作用。Ti引起的组织细化还可以防止铸造过程中产生热裂,并可使得合金内部晶间腐蚀程度降低。在Al-Zn-In-Mg-Ti中,基体组织为 $\alpha\text{-Al}$ ,第二相于晶界间分散。少量Ti能促使Zn均匀分布,减少活化元素锌、铜偏析,改善阳极溶解状况,在与Mg共同工作的情况下,电流效率也较高。

6) Ga和Al, In属同一主族的金属元素,其作用在近年来得到了广泛的研究<sup>[28-32]</sup>。Ga的添加量在0.1%(质量分数)时,可使Al的电极电位负移100 mV左右,是用于研制低电位牺牲阳极的理想合金元素,但同时添加Zn, Ga使电位负移的效果低于单独添加Ga。

7) 加入少量的Mn可与杂质元素反应,令其失去化学活性,降低铝锭中杂质Fe对阳极溶解性能的有害作用。

### 3.2 杂质元素

除合金元素外,铝锭中的杂质也是影响阳极性能的因素之一,常见的杂质有Fe, Cu, Si。Fe是铝阳极中的主要杂质元素,Fe和Si少量存在时(Si的质量分数在0.041%~0.212%),可减小阳极局部腐蚀倾向,但过量时则增加阳极局部腐蚀倾向,使得阳极效率降低,溶解形貌变差。Cu是有害元素,少量的Cu就会造成阳极发生点蚀,降低阳极的溶解性能,且使得腐蚀产物不易脱落。因此,在熔炼阳极时需考虑铝锭原材料的杂质情况。

### 3.3 熔炼工艺

由于热处理工艺影响元素的分布、金相结构等,因此热处理工艺对其性能也有重要的影响。热处理可以使阳极性能优化,还可减少杂质元素对阳极性能的影响。通过适当的热处理方式可以使阳极微观组织更均匀,从而提高其电化学性能<sup>[26]</sup>。针对热处理对于阳极性能的影响研究,多是针对含Sn和Mg的阳极配方。通过均匀化热处理,使得大多数合金元素固溶到基体中,减少偏析相,分布更均匀,从而达到改善阳极溶解性能提高电流效率的目的。由于热处理工艺成本较高,从生产应用的角度,应设法避免热处理步骤。

## 4 当前存在问题分析

铝合金牺牲阳极经过多年的发展,已经形成了较为完善材料体系,但随着材料技术和海洋工程装备的发展,尚存在以下方面的问题有待解决。

1) 原材料的变化引起阳极性能下降。随着铝熔炼技术的发展,以及我国关于铝锭原材料标准规定的变化,熔炼铝合金牺牲阳极原材料的杂质含量特点发生了变化,导致在实际生产中出现阳极成分合格,但电化学性能不满足标准规定的现象。主要表现为:按照标准成分生产的阳极,电化学性能不能满足标准要求,具体表现为容量低,溶解形貌不均匀;有时阳极成分不符合标准规定,电化学性能反而可满足要求。按规定阳极成分和电化学性能有一项不合格,均应按不合格产品处理,应予以材料报废,导致巨大的经济损失和极大的资源浪费。铝合金牺牲阳极中的微量元素成分与铝锭原材料的杂质元素含量往往在一个数量级,而且高效铝合金牺牲阳极中,微量元素种类较多,与杂质元素的作用较为复杂,导致有些微量元素的作用失效,使得牺牲阳极的效率降低。因此,须对原材料变化导致的牺牲阳极性能变化进行深入的研究,掌握其影响规律,针对原材料的特点,研制出新型高效铝合金牺牲阳极材料。

2) 特殊环境中应用的阳极材料性能仍需改善。随着深海武器装备以及新材料的发展,对阳极材料提出了新的要求。如潜艇上浮下潜要求阳极在水面、深海以及深浅海交变环境均具有优异的性能。北极航道的开通,要求阳极在低温海水环境中具有良好的活化性能,且能够经受浮冰的冲击摩擦。另外,港口环境存在污染物增多、有淡水注入等特点,也需服役于其中的牺牲阳极具有相应的环境适应性。现有牺牲阳极材料在上述工况环境中的性能不理想<sup>[33]</sup>。

3) 牺牲阳极熔炼工艺水平有待提高。我国牺牲阳极材料熔炼水平整体不高,存在大量的作坊式生产,熔炼工艺标准化程度差,阳极产品性能不稳定。一方面,合金元素含量极低,且部分元素熔点低,添加过程中可能发生烧损,导致成分控制精度差;另一方面,浇铸大块阳极时容易产生气孔,导致阳极不合格,废品率提高。因此,须进一步提高生产工艺水平,降低能耗,提高阳极质量,占领国际高端市场<sup>[34]</sup>。

## 5 结语

铝合金牺牲阳极材料经过多年的发展,已形成一系列的产品,并在海洋工程装备的腐蚀防护中得到了广泛应用,取得了良好的保护效果。随着海洋工程的发展,对铝合金牺牲阳极的性能不断提出新的需求,铝合金牺牲阳极的发展趋势如下:高性能、绿色环保、

低成本是铝合金牺牲阳极材料的总体发展方向; 海洋构筑物阴极保护用牺牲阳极材料体系不断发展和完善, 以满足不同工况环境、不同被保护材料的腐蚀防护需求; 进一步探清杂质元素对阳极性能的影响及相应的控制方法, 并改善阳极生产工艺, 提高阳极生产质量; 牺牲阳极的相关标准也将不断修订, 以适应材料技术发展的需求, 提高铝合金牺牲阳极材料标准化水平。

#### 参考文献:

- [1] BRESLIN C B. Influence of Impurity Elements on Electrochemical Activity of Aluminum Activated by Indium[J]. *Corrosion*, 1993(11): 395-402.
- [2] 齐公台, 郭稚弧, 屈钧娥. 合金元素 Mg 对含 RE 铝阳极组织与性能的影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2001(4): 220-224.
- [3] KESSLER R J, POWERS R G, LASAL R. Sacrificial Anode Protection of an Underground Steel Reinforced Concrete Structure[J]. *Mater Perform*, 1998 (3): 10-17.
- [4] REDING J T, NEWPORT J J. The Influence of Alloying Elements on Aluminum Anodes in Sea Water[J]. *Mater Protect*, 1966, 5(12): 15-18.
- [5] 郭炜, 文九巴, 马景灵, 等. 铝合金牺牲阳极材料的研究现状[J]. *腐蚀与防护*, 2008, 29(8): 495-498.
- [6] 刘学庆, 张经磊, 侯保荣. 海洋工程用铝基牺牲阳极发展概况[J]. *海洋科学*, 2000, 24(8): 38-41.
- [7] MUÑOZ A G, SAIDMAN S B, BESSONE J B. Corrosion of an Al-Zn-In Alloy in Chloride Media[J]. *Corrosion Science*, 2002, 44(10): 2171-2182.
- [8] 郭忠诚, 宋曰海, 耿卫东. 铝-锌-钢系列高性能牺牲阳极材料的研究[J]. *机械工程材料*, 2005(2): 38-41.
- [9] SAKANO T, TODA K, HANADA M. Tests on the Effects of Indium for High Performance Aluminum Anodes[J]. *Mater Protect*, 1966, 5(12): 45-50.
- [10] 马丽杰, 宋曰海, 郭忠诚, 等. Al-Zn-In-Cd 牺牲阳极材料的电化学性能研究[J]. *材料开发与应用*, 2004, 19(1): 32-34.
- [11] 安晓雯, 袁传军, 王慧莹. Al-Zn-In-Si-Mg 合金活性溶解的临界氯离子浓度研究[J]. *大连民族大学学报*, 2005, 7(3): 66-68.
- [12] 白芸. Al-Zn-In-Si-Mg 系合金牺牲阳极的金相学研究[J]. *鞍山师范学院学报*, 1999(3): 94-98.
- [13] SHAYEB H A, WAHAB F M A, ABEDIN S Z. Role of Indium Ions on the Activation of Aluminum[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1999, 29(5): 601-609.
- [14] 马燕燕. 牺牲阳极在海水干湿交替条件下的电化学性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [15] 方志刚, 刘斌, 王涛. 干湿交替条件下牺牲阳极再活化性能试验[J]. *舰船科学技术*, 2013, 35(1): 65-69.
- [16] 黄振风, 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.
- [17] 于辉, 钱建华, 吴建华. 自来水和淡水介质中高活化铝合金牺牲阳极的电化学性能[J]. *材料开发与应用*, 2000, 15(1): 17-20.
- [18] 戴明安. 一种电热水器用铝锌系合金牺牲阳极: 中国, 2009101509342[P]. 2009-06-20.
- [19] 张海兵, 马力, 李威力, 等. 深海牺牲阳极模拟环境电化学性能研究[J]. *材料开发与应用*, 2015, 30(5): 63-67.
- [20] 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.
- [21] LI W L, YAN Y G, CHEN G, et al. The Development of a New Type Aluminum Anode for Deepwater Cathodic Protection[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 317-319(12): 189-193.
- [22] 马力, 李威力, 曾红杰, 等. 低驱动电位 Al-Ga 合金牺牲阳极及其活化机制[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2010, 30(4): 329-332.
- [23] 马力, 曲本文, 闫永贵, 等. 低驱动电位铝合金牺牲阳极的研制[J]. *材料开发与应用*, 2014, 29(3): 61-65.
- [24] REBOUL M C, DELATTE M C. Activation Mechanism for Sacrificial Al-Zn-Hg Anodes[J]. *Materials Performance*, 1980, 19(5): 35-40.
- [25] DESPIĆ A R, DRAŽIĆ D M, PURENOVIĆ M M, et al. Electrochemical Properties of Aluminum Alloys Containing Indium, Gallium and Thallium[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1976, 6(6): 527-542.
- [26] GURRAPP A I. The Surface Free Energy and Anode Efficiency of Aluminum Alloys[J]. *Corrosion Prevention & Control*, 1993: 111-114.
- [27] 林顺岩, 王彬. 高性能铝合金阳极材料的研究与开发[J]. *铝加工*, 2002, 25(2): 6-9.
- [28] ARAGON E, CAZENAVE-VERGEZ L, LANZA E, et al. Influence of Alloying Elements on Electrochemical Behavior of Ternary Al-Zn-Ga alloys for Sacrificial Anodes [J]. *British Corrosion Journal*, 1997, 32(4): 263-268.
- [29] ARAGON E, CAZENAVE-VERGEZ L, LANZA E, et al. Electrochemical Behavior of Binary Al-Ga and Ternary Al-Zn-Ga Alloys as Function of Thermodynamic Properties[J]. *British Corrosion Journal*, 1997, 32(2): 121-126.
- [30] BRESLIN C B, CARROLL W M. The Electrochemical Behavior of Aluminum Activated by Gallium in Aqueous Electrolytes[J]. *Corrosion Science*, 1992, 33(11): 1735-1746.
- [31] 袁传军, 梁成浩, 安晓雯. Ga 对 Al-Zn-In 合金牺牲阳极电化学性能影响[J]. *大连理工大学学报*, 2004, 44(4): 502-505.
- [32] 张信义, 王元玺, 火时中. Al-Zn-Mg-In-Ga-Ca 合金牺牲阳极电化学性能的研究[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 1995, 7(1): 53-57.
- [33] 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.
- [34] 陈光章, 闫永贵, 马力. 我国牺牲阳极阴极保护现状 [C]// 中国科协年会论文集. 福州: 中国科学技术协会, 2010.