

船用铝合金在海洋环境中的腐蚀研究

侯健, 张彭辉, 郭为民

(海洋腐蚀与防护国防科技重点实验室, 山东 青岛 266101)

摘要: 介绍了Al-Cu, Al-Mg, Al-Si系等3种主要的船用铝合金在海洋环境中的应用和腐蚀研究现状,对三种铝合金的性质以及在船舶及船用设备领域中的具体应用进行了概述,对船用铝合金在不同海域海洋大气、表层海水、深海海洋环境下的腐蚀状况以及在模拟海水条件下的腐蚀研究进展进行了归纳。已有研究表明,海洋环境下船用铝合金的腐蚀形式主要为点蚀和应力腐蚀,其腐蚀程度和敏感性随海水深度的增加而增大,相同海洋环境下Al-Mg系铝合金具有较好的耐腐蚀性能。最后结合实际生产和应用现状,对船用铝合金的发展趋势及其在海洋环境下的腐蚀研究工作的进一步开展做了展望。

关键词: 船舶; 铝合金; 海洋环境; 腐蚀

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.02.013

中图分类号: TJ04; TG172.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)02-0059-05

Study on Corrosion of Aluminum Alloys for Ship Applications in Marine Environment

HOU Jian, ZHANG Peng-hui, GUO Wei-min

(State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266101, China)

ABSTRACT: In this paper, the application and current corrosion research of three series of aluminum alloys, namely Al-Cu, Al-Mg and Al-Si, in marine environment were reviewed. The properties of the three kinds of aluminum alloys and their detailed applications in the field of ships and marine equipments were briefly illustrated. The corrosion of aluminum alloys under marine atmosphere, surface seawater and deep ocean in different sea sites as well as the research progress on corrosion under simulated seawater condition was also summarized. The researches have shown that the main corrosion types of aluminum alloys for ship applications in different marine environment were pitting corrosion and stress corrosion. The degree and susceptibility of corrosion aggravate with the increase of the seawater depth. Among these three kinds of aluminum alloys, the Al-Mg series of materials show the best corrosion resistance. Finally, based on the manufacture and utility status, we prospected the research and development tendency of aluminum alloys for ship applications and the corrosion research in marine environment.

KEY WORDS: ships; aluminum alloys; marine environment; corrosion

收稿日期: 2014-12-30; 修订日期: 2015-03-05

Received: 2014-12-30; Revised: 2015-03-05

作者简介: 侯健(1980—),男,山东淄博人,硕士,高级工程师,主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Biography: HOU Jian(1980—), Male, from Zibo, Shandong, Master, Senior engineer, Research focus: corrosion and protection of materials.

铝及铝合金具有较低的密度、良好的力学性能、加工性能、导热性、导电性以及耐蚀性,因此在船舶及船用设备领域中的应用日趋广泛,对减轻船体结构质量、提高航行速度和耐海水腐蚀能力、减少能耗等方面有着重要作用^[1]。耐蚀性能是影响铝合金海洋环境中应用的重要指标之一,铝合金在海洋环境中的腐蚀以点蚀、缝隙腐蚀和晶间腐蚀等局部腐蚀为主^[2-5]。铝合金的腐蚀因其化学成分不同、海水环境因素不同而有较大的差异。积累铝合金在不同海域的腐蚀数据,研究其在海洋环境下的腐蚀行为和规律,对于指导铝合金在船舶及船用设备领域中的科学选材及合理应用有着重要意义。

1 铝合金的应用

铝及铝合金在造船工业应用越来越广,小到舢板、汽艇,大到万吨巨轮,从民用到军用,从高速气垫船到深水潜艇,从渔船到海洋采矿船,都在采用性能良好的铝合金材料作为船壳体、上层结构、各种设施、管路以及用具等。

1.1 在船体结构上的应用

船舶用铝合金主要有 Al-Cu, Al-Mg 和 Al-Si 系铝合金。1892 年法国采用 Al-Cu 系合金建造了第一艘 12.2 m 长的海上全铝汽艇。Al-Cu 系铝合金在俄罗斯及我国早期船舶上得到较多应用,俄罗斯目前已有各种类型的铝合金高速艇船约 1000 艘,其使用较多的快艇壳体材料是 Al-Cu 系铝合金 2A90, 2A80, 2A14^[6]。由于 Al-Cu 系合金抗腐蚀性不佳,因此限制了其在造船领域中的应用。20 世纪 60 年代初,我国以 2024 铝合金做船体材料,用于水翼快艇的成批建造^[6]。在船舶壳体结构上用 Al-Mg 系铝合金主要是 5083, 5086, 5456, 5466 等,它们有较好的耐腐蚀性能、力学性能和焊接性能^[7-8]。1966—1971 年美国建成 14 艘“阿希维尔”级高速炮艇,这是第一批全铝军舰,主甲板和船底板为 1217 mm 厚的 5086-H32 铝合金,型材用 5086-H112 铝合金,全艇共用了 71 t 铝材,全部用氩弧焊接^[6-8]。1981 年美国波音公司船舶系统建造了 6 艘铝船体水翼导弹巡逻艇,采用 5456 铝合金焊接结构^[7-8]。2012 年,美国 Austal US 公司建造了首批“警惕”号全铝双体高速运输舰,采用美国铝业公司提供的 5083 铝合金板^[6]。我国最新快船的壳体主体材料采用 5083 铝合金。另外美国海军第一艘弹道导弹驱逐舰“杜威”号的上层建筑中应用的 811.30 t 铝合金中大

部分是 5466 厚板和 5086 薄板。铝构件代替了钢后,质量减轻了 150 t。1970 年日本建造了大型铝合金客船“希霍库”2 号,壳体主体材料采用 5083 铝合金。1931 年 8 月英国建造了“地爱那号”全铝游艇,材料是 Al-Si 系合金^[8]。英国在 20 世纪 80 年代建造了全焊气垫船 AP188,壳体采用 Al-Mg 系铝合金 5083,型材采用 Al-Si 系铝合金 6082^[6]。美国用铝合金建造了“LARC-15”登陆艇主要材料用 5086,同时部分焊接结构采用 5083 和 6061。

1.2 在船舶设备中的应用

Al-Cu 系铝合金 2A10 是铝质铆钉的专用材料,用于铝质快艇、民用船舶的上层建筑及船体的铆接构件^[6]。Al-Mg 系铸造合金常用于制造承载较大的海水泵壳体、水泵导管及支柱等,如 5A02 常用于制造船用主机的油罐、油箱及机座支架等;5A03 用于轻隔壁、围壁、散热器、管路及烟囱壳体等船舶焊接结构和零件;5A05 用于制造船壳体、构架、桅杆等;5A06 用于上层建筑、构架等。Al-Si 系铸造铝合金强度中等,铸造性能好,适合制造形状复杂、致密度高的部件,如高压阀件、泵、柴油机气缸体、减速箱壳体、涡轮叶片等^[7]。

2 铝合金在海洋环境中的腐蚀

大多数铝合金在海洋环境中都表现出优良的耐蚀性。这不仅是由于保护性钝化膜的作用,而且在相当程度上也与在铝的活化和钝化表面上析氢过电位高有关。铝及铝合金在海洋环境中的主要腐蚀形式是点蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀以及剥蚀等局部腐蚀。

2.1 海洋大气环境

海洋大气的高湿度以及侵蚀性 Cl 的存在是导致金属材料腐蚀的重要因素。Al-Cu 系铝合金 2A12 在海洋大气环境中普遍存在点蚀现象,在海洋大气环境下 2A12 铝合金材料在 1~3 年间腐蚀比较缓慢,从第 4 年开始,腐蚀急剧增加。模拟海洋大气环境中的研究表明,在 90% 湿度条件下出现最大点蚀深度^[10],在实际环境的暴露实验中还有剥蚀现象发生^[11]。此外,在海洋性环境下,高强度铝合金还具有较高的应力腐蚀敏感性。在青岛、海南大气环境下暴露不到 1 年,2A12 铝合金即产生了应力腐蚀开裂^[12]。

Al-Mg 系铝合金在海洋大气中的腐蚀率较低,在

5A02, 5A03在青岛海洋大气中暴露1年的平均腐蚀率为0.32~0.85 $\mu\text{m/a}$, 暴露8年, 其腐蚀率 $<0.4 \mu\text{m/a}$ 。此外, Al-Mg系铝合金还具有较好的耐点蚀性能, 5A02, 5A03在暴露8年后点蚀深度小于0.3 mm, 显示出良好的耐蚀性^[13]。在海南大气环境下对不同牌号的铝合金进行暴露实验发现, 暴露1年后腐蚀失重较轻的是Al-Cu系铝合金2A12, Al-Mg系铝合金5A02相对较大, 但暴露10年后5A02腐蚀失重增加不到1倍, 相比之下具有良好的长期耐腐蚀性能^[14]。

2.2 表层海水环境

Al-Cu系铝合金2A12在海水中腐蚀较快, 在青岛全浸区暴露1年的最大点蚀深度为2.3 mm。暴露2年最大点蚀深度为2.65 mm, 并且试样侧面应力腐蚀开裂严重^[15], 加覆包铝层后其耐蚀性大大提高平均腐蚀速率与纯铝接近^[16]。在三亚全浸区暴露1年点蚀严重, 平均点蚀深度和最大点蚀深度分别为1.48, 2.03 mm, 并出现明显晶间腐蚀。

Al-Mg系铝合金在海水中具有较好的耐蚀性, 5A02, 5A06在青岛全浸区暴露8年点蚀深度小于0.4 mm, 暴露16年小于0.9 mm^[13], 在舟山全浸区实海暴露8年基本上无局部腐蚀^[17]。5A03在三亚全浸区暴露8年最大点蚀深度为1.00 mm, 暴露16年最大点蚀深度为1.43 mm。5A02, 5A06在青岛海水潮差区的耐蚀性能较好, 暴露4年未发现可测量的蚀点, 同时耐缝隙腐蚀性能也较好, 5A03青岛潮差区暴露4年的最大点蚀深度为0.21 mm^[18-19], 5A02, 5A03铝合金在三亚潮差区暴露8年的平均点蚀深度分别为0.04, 0.27 mm。同时5A02, 5A03铝合金在飞溅区也表现出较好的耐蚀性能, 在青岛飞溅区暴露2年的平均点蚀深度分别为0.18, 0.22 mm, 最大点蚀深度为0.32, 0.43 mm^[20]。5A03铝合金在厦门飞溅区暴露8年的平均点蚀深度和最大点蚀深度分别为0.24, 0.39 mm^[19]。

Al-Si系铝合金耐海水腐蚀性能低于Al-Mg系铝合金, 6A02在厦门和三亚全浸区暴露1年的最大点蚀深度分别为1.44, 1.20 mm^[19], 在三亚全浸区暴露2年的最大点蚀深度增加到1.53 mm。在青岛潮差区暴露1年的平均点蚀深度为0.14 mm, 最大点蚀深度为0.17 mm。暴露16年的平均点蚀深度为0.76 mm, 最大点蚀深度为1.62 mm^[18]。在三亚6A02铝合金暴露16年的平均点蚀深度为0.58 mm, 最大点蚀深度为1.52 mm^[18]。在飞溅区6A02的点蚀容易形成, 密度很大, 但点蚀速度较慢, 深度较小^[18]。在青岛飞溅区暴露8年的最大点蚀深度0.18 mm, 16年的最大点蚀深度0.30 mm^[19]。

2.3 深海环境

Venkatesan采用腐蚀失重的方法研究了2000系铝合金在太平洋和印度洋不同深度海水环境中的腐蚀速率, 结果发现, 2000系铝合金在深海环境下腐蚀速率增大^[21]。Reinhart研究了Al-Mg系5086铝合金在700~1600 m深海中的腐蚀行为, 发现在深海中其点蚀深度在1.3~1.9 mm/a之间, 而在表层海水中典型点蚀深度则在0.13 mm/a以下, 点蚀深度增加了10倍以上^[22]。Schumacher报道了在太平洋2060 m深度下, Al-Si系6061铝合金的平均点蚀深度为1.07 mm/a, 远高于表层海水中0.20 mm/a的试验结果^[22]。

同点蚀一样, 深海环境下铝合金的缝隙腐蚀也比较严重。Groover对5050铝合金在深海环境下的腐蚀研究发现, 其最大缝隙腐蚀深度为0.16 mm^[23]。5052铝合金在表层海水中未出现缝隙腐蚀, 但在深海试验中不到200天就出现了1.65 mm的缝隙, 并导致穿孔^[23]。

随深度的增加, 海水的温度、溶解氧等环境因素具有显著差异, 对深海环境下金属腐蚀产生重要影响。郭为民等^[24]对5083铝合金在不同温度和溶解氧条件下的腐蚀规律进行了研究, 结果表明, 溶解氧含量越高, 5083铝合金表面越易形成氧化膜, 自腐蚀电位越正; 温度越低, 其耐蚀性也越好。他还采用具有自主知识产权的深海环境试验装置^[25]在国内首次于我国南海海域不同深度成功开展了深海实海环境实验, 结果发现, 不同深度暴露的5083试样均在固定孔周围发生严重的缝隙腐蚀, 并向周围扩展。随着暴露深度的增大, 局部腐蚀的面积和深度增加, 在800 m处和1200 m处暴露3年的平均腐蚀速率分别为0.048, 0.054 mm/a。北京科技大学的李晓刚^[26]等搭载此装置进行了5052和6061铝合金在不同深度的实海暴露试验, 结果表明, 5052和6061铝合金在1200 m深度下最大蚀坑深度低于800 m下的数据, 并且同种环境下5052铝合金腐蚀速率和最大点蚀坑深度远低于6061铝合金。Al-Mg合金在太平洋表层海水和深海中的腐蚀行为表明, 深海环境下点蚀速率要快于表层海水环境, 并随深度增加呈现先增加后降低的过程, 在700 m深度点蚀速率达到最大值^[27]。在相同环境条件下, Al-Cu系合金2014在各深海环境下均腐蚀严重, Al-Mg系合金则表现为均匀腐蚀及少量稀疏的点蚀, Al-Si系合金6061在深海暴露后表面表现为泥裂特征^[28]。

2.4 模拟海洋环境

刘艳洁等^[29]利用循环盐雾腐蚀实验模拟了2024铝合金在海洋大气环境中的腐蚀过程。腐蚀过程中2024铝合金的表面形成了具有较好保护性的锈层,其保护性呈现随腐蚀时间的延长先增强后减弱然后再略增强的变化过程。张正贵等^[30]研究了Al-Cu系铝合金2A12在3.5%(质量分数)NaCl溶液中的腐蚀疲劳行为,在自腐蚀条件下,其腐蚀疲劳过程属于阳极溶解机制控制,微观断口仍然以解理、准解理及沿晶开裂等脆性特征为主。张晓云等^[12]利用2A12铝合金C形环试样在3.5%NaCl溶液中开展了周期浸润腐蚀试验,证明2A12铝合金具有较高的应力腐蚀敏感性,多数2A12铝合金在1周之内产生应力腐蚀开裂。王曰义^[31]研究了不同流速状态下铝合金的腐蚀行为以及海水流速对铝合金腐蚀的影响,2A12铝合金在海水流速大于3.4 m/s时,出现蜂窝状肿胀或腐蚀溃疡,在5.3 m/s时,最大蚀坑深度达0.9 mm。5A05在海水流速低于3.4 m/s时,无明显腐蚀出现,在海水流速为7.6 m/s时,所有试样表面上都发现有少量点蚀。

单毅敏等^[32]研究发现在3.5%NaCl溶液中Al-Mg系铝合金5083在热处理情形相同的条件下,Mg含量低的5083铝合金耐腐蚀能力要比Mg含量高的好。张波等^[33]比较了5083铝合金在静态和流动海水条件下的腐蚀行为的差异,在静止海水中5083铝合金的耐蚀性比较好,腐蚀率较小。随着海水流速的增加,耐蚀性迅速降低,当海水流速为2 m/s时,平均腐蚀速率即增加到静水中的8倍。

郑传波等^[34]研究了6061铝合金在模拟海洋大气环境中的腐蚀电化学行为,其在模拟海洋大气环境中表面不同区域活性溶解程度不同,腐蚀产物数量较少,分布不均匀,腐蚀点主要呈圆形。韩东锐等^[35]研究了6061铝合金在室内模拟海水中的腐蚀行为。研究表明6061铝合金在常温海水中的腐蚀形貌为点蚀,在高温海水中6061铝合金表面易形成钝化膜且腐蚀轻微。

3 总结与展望

铝合金在减轻船体质量、提升航速以及减少能耗等方面的巨大优势,使其作为造船的基本材料已成为趋势。为继续拓展应用,船用耐蚀铝合金研究需要更进一步的发展完善。一是注重现有材料的改进和新型产品的开发,如改进铸造工艺,提升耐蚀铸造铝合

金的铸造工艺性能;探索新型辅助元素的增加,改进耐蚀变形铝合金的焊接性能等。研发新型船用耐蚀铝合金材料,通过添加诸如钒、锰、铬、锆、钛等微量元素、控制加工及热处理工艺,保证铝合金具有较高耐蚀性能的同时生产工艺简单可行。二是加强对船用铝合金材料腐蚀理论与防护方法的研究,对铝合金材料在实际环境中的腐蚀机理进行更加深入的探讨。同时在实际施工应用中综合采用防腐涂层及包铝等保护措施减少因铝合金材料固有特性而导致的局部腐蚀,并应尽量避免电偶腐蚀和应力腐蚀的发生。

参考文献:

- [1] 刘希燕,蒋健明,陈正涛,等. 铝合金防腐保护研究进展[J]. 现代涂料与涂装,2007,10(12):11—14.
LIU Xi-yan, JIANG Jian-ming, CHEN Zheng-tao, et al. Research Progress in Anti-Corrosive Protection for Aluminum Alloys[J]. Modern Paint & Finishing, 2007, 10(12): 11—14.
- [2] 林学丰. 铝合金在舰船中的应用[J]. 铝加工,2003:10—37.
LIN Xue-feng. Application of Aluminum Alloy in Vessel[J]. Aluminum Fabrication, 2003: 10—37.
- [3] 魏梅红,刘徽平. 船舶用耐蚀铝合金的研究进展[J]. 轻合金加工技术,2006,34(12):6—8.
WEI Mei-hong, LIU Wei-ping. Research Progress of Corrosion Resistant Aluminum Alloys for Ship Applications[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2006, 34(12): 6—8.
- [4] 陈朝轶,杨京,李军旗,等. 模拟海洋大气环境下Cl⁻质量分数对3003铝合金腐蚀行为的影响[J]. 表面技术,2015,44(3):116—121.
CHEN Chao-yi, YANG Jing, LI Jun-qi, et al. Effect of Chloride Ion Concentration on Corrosion Behavior of 3003 Aluminum Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 116—121.
- [5] 齐浩淳,张小玲,谢雪松,等. 海洋环境下晶体管加速腐蚀试验中的问题探究[J]. 四川兵工学报,2014,35(7):110—114.
QI Hao-chun, ZHANG Xiao-ling, XIE Xue-song, et al. Problem Exploration in Accelerating Corrosion Test of Transistors in the Marine Environment[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(7): 110—114.
- [6] 王文杰. 高性能先进舰船用合金材料的应用现状及展望[J]. 材料导报A:综述篇,2013,27(4):98—105.
WANG Wen-jie. The Application Status and Perspective of Alloys for High Performance and Advanced Naval Vessels[J]. Materials Review A: Review, 2013, 27(4): 98—105.
- [7] 黄晓艳,刘波. 舰船用结构材料的现状与发展[J]. 船舶,2004(3):21—24.
HUANG Xiao-yan, LIU Bo. Current Situation and Develop-

- ment of Warship Structure Material[J]. Ship & Boat, 2004(3): 21—24.
- [8] 赵勇,李敬勇,严铿. 铝合金在舰船建造中的应用与发展[J]. 技术与工艺, 2005(2): 28—30.
ZHAO Yong, LI Jing-yong, YAN Keng. The Application and Development of Aluminum Alloys in Vessels Building[J]. Technology & Process, 2005(2): 28—30.
- [9] 梁岩,王国军. 舰船用 Al-Mg 系铝合金[J]. 黑龙江冶金, 2007(3): 3—6.
LIANG Yan, WANG Guo-jun. The Al-Mg Series of Aluminum Alloys Applied in Vessels[J]. Heilongjiang Metallurgy, 2007(3): 3—6.
- [10] 韩德盛,李获. 海洋大气湿度对 LY12 铝合金初期腐蚀的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(3): 134—136.
HAN De-sheng, LI Di. Influence of Marine Atmosphere Humidity on Initial Corrosion of LY12[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(3): 134—136.
- [11] 马腾,王振尧,韩薇. 铝和铝合金的大气腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(3): 155—161.
MA Teng, WANG Zhen-yao, HAN Wei. A Review of Atmospheric Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(3): 155—161.
- [12] 张晓云,孙志华,刘明辉,等. 环境对高强度铝合金应力腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 354—362.
ZHANG Xiao-yun, SUN Zhi-hua, LIU Ming-hui, et al. Influence of Different Environments on Stress Corrosion Cracking of High Strength Aluminum Alloys[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(6): 354—362.
- [13] 黄桂桥. 铝合金在青岛海域的腐蚀行为[C]// 2000 年材料科学与工程新进展(下)—2000 年中国材料研讨会论文集. 北京: 中国材料研究学会, 2000.
HUANG Gui-qiao. Aluminum Alloy Corrosion Behavior in Qingdao Sea Area [C]// New Progress in Materials Science and Engineering, 2000 (Bottom)—2000 Materials Symposium on CHINA. Beijing: Chinese Materials Research Society, 2000.
- [14] 文邦伟,李继红. 铝及铝合金在热带海洋地区大气腐蚀[J]. 表面技术, 2004, 33(6): 21—23.
WEN Bang-wei, LI Ji-hong. Atmospheric Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys in Tropic Sea Shore Area[J]. Surface Technology, 2004, 33(6): 21—23.
- [15] 黄桂桥. 铝合金在海洋环境中的腐蚀研究(II)—海水全浸区 16 年暴露试验总结[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(2): 47—50.
HUANG Gui-qiao. Corrosion of Aluminum Alloys in Marine Environment (II)—A Summary of 16 Years Exposure Testing in Seawater Full Immersion Zone[J]. Corrosion & Protection, 2002, 23(2): 47—50.
- [16] 黄桂桥. 铝合金在海水中的耐蚀性与腐蚀电位的关系[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1998, 10(3): 150—153.
HUANG Gui-qiao. Relationship Between Corrosion Resistance and Corrosion Potential of Aluminum Alloys in Seawater[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1998, 10(3): 150—153.
- [17] 金威贤. Al 及 Al 合金在舟山海域的腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13: 440—442.
JIN Wei-xian. Corrosion Behavior of Aluminum Alloys at Zhoushan Sea Area[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2001, 13: 440—442.
- [18] 黄桂桥. 铝合金在海洋环境中的腐蚀研究(I)—海水潮汐区 16 年暴露试验总结[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(1): 18—23.
HUANG Gui-qiao. Corrosion of Aluminum Alloys in Marine Environment (I)—A Summary of 16 Years Exposure Testing in Seawater Tide Zone[J]. Corrosion & Protection, 2002, 23(1): 18—23.
- [19] 林乐耘,赵月红. 我国海域海水对防锈铝合金的腐蚀性及其材料因素影响的规律[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1246—1251.
LIN Le-yun, ZHAO Yue-hong. Seawater Corrosivity of Sea Areas in China to Al-Mg Alloys and Regularity Influenced by Material Factors[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(5): 1246—1251.
- [20] 黄桂桥. 铝合金在海洋环境中的腐蚀研究(III)—海水飞溅区 16 年暴露试验总结[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24(2): 47—57.
HUANG Gui-qiao. Corrosion of Aluminum Alloys in Marine Environment (III)—A Summary of 16 Years Exposure Testing in Splash Zone[J]. Corrosion & Protection, 2003, 24(2): 47—57.
- [21] VENKATESAN R. Studies on Corrosion of Some Structural Materials in Deep Sea Environment[D]. India: Department of Metallurgy India Institute of Science. 2000.
- [22] SCHUMACHER M. 海水腐蚀手册[M]. 李大超,译. 北京:国防工业出版社, 1985.
SCHUMACHER M. Seawater Corrosion Handbook[M]. LI Da-chao, Translation. Beijing: National Defense Industry Press, 1985.
- [23] 彭文才,侯健,郭为民. 铝合金深海腐蚀研究进展[J]. 材料开发与应用, 2010(1): 59—62.
PENG Wen-cai, HOU Jian, GUO Wei-min. Research Progress on the Corrosion of Aluminum Alloy in Deep Ocean[J]. Development and Application of Materials, 2010(1): 59—62.
- [24] 彭文才,侯健,郭为民,等. 温度和溶解氧对 5083 铝合金海

- [12] 袁兴鹏. 基于半实物仿真的电子对抗效果等效推算方法及模型研究[J]. 舰船电子对抗, 2007, 30(2): 50—54.
YUAN Xing-peng. Equivalent Calculation Method of EW Effect and Model Research Based on Half-object Simulation [J]. Shipboard Electronic Counter Measure, 2007, 30(2): 50—54.
- [13] 朱宇光. 靶场复杂电磁环境构建[J]. 四川兵工学报, 2012, 32(3): 119—120.
ZHU Yu-guang. The Construction of Complex Electromagnetic Environment in Training Range[J]. Journal of Sicuan Ordnance, 2012, 32(3): 119—120.
- [14] 王晶, 李智, 来嘉哲, 等. 虚拟战场电磁环境构建方法研究[J]. 现代防御技术, 2009, 12(37): 11—16.
WANG Jin, LI Zhi, LAI Jia-zhe, et al. Construction Method of Virtual Field Electromagnetic Environment[J]. Modern Defence Technology, 2009, 37(6): 11—16.
- [15] 丁潇, 陈亚洲. 战场复杂电磁环境的仿真与构建方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 33—37.
DING Xiao, CHEN Ya-zhou. Research on Simulation and Construction Method of Complex Battlefield Electromagnetic Environment[J]. Equipment Environment Engineering, 2011, 8(1): 33—37.
- (上接第 63 页)
- 水腐蚀性的影响[J]. 装备环境工程, 2010, 7(3): 22—26.
PENG Wen-cai, HOU Jian, GUO Wei-min, et al. Effect of Temperature and Dissolved Oxygen on Corrosion Performance of Alloy 5083 in Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(3): 22—26.
- [25] 郭为民, 李文军, 陈光章. 材料深海环境腐蚀试验[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 10—15.
GUO Wei-min, LI Wen-jun, CHEN Guang-zhang. Corrosion Testing in the Deep Ocean[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(1): 10—15.
- [26] 孙飞龙, 李晓刚, 卢琳, 等. 5052 和 6061 铝合金在中国南海深海环境下的腐蚀行为研究[J]. 金属学报, 2013, 49(10): 1219—1226.
SUN Fei-long, LI Xiao-gang, LU Lin, et al. Corrosion Behavior of 5052 and 6061 Aluminum Alloys in Deep Ocean Environment of South China Sea [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(10): 1219—1226.
- [27] 黄雨舟, 董丽华, 刘伯洋. 铝合金深海腐蚀的研究现状及发展趋势[J]. 材料保护, 2014, 47(1): 44—47.
HUANG Yu-zhou, DONG Li-hua, LIU Bo-yang. Current Status and Development Trend on Corrosion of Aluminum Alloy in Deep Sea[J]. Materials Protection, 2014, 47(1): 44—47.
- [28] 周建龙, 李晓刚, 程学群, 等. 深海环境下金属及合金材料腐蚀研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(1): 47—51.
ZHOU Jian-long, LI Xiao-gang, CHENG Xue-qun, et al. Research Progress on Corrosion of Metallic Materials in Deep Sea Environment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(1): 47—51.
- [29] 刘艳洁, 王振尧, 柯伟. 2024-T3 铝合金在模拟海洋大气环境中的腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 1208—1216.
LIU Yan-jie, WANG Zheng-yao, KE Wei. Corrosion Behavior of 2024-T3 Aluminum Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(5): 1208—1216.
- [30] 张正贵, 周兆元, 刘长勇. 高强度铝合金构件腐蚀疲劳失效分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(1): 48—52.
ZHANG Zheng-gui, ZHOU Zhao-yuan, LIU Chang-yong. Corrosion Fatigue Fracture Failure Analysis of High-Strength Aluminum Alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(1): 48—52.
- [31] 王曰义. 铝合金在流动海水中的腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 72—76.
WANG Yue-yi. Corrosion Behavior of Aluminum Alloy in Flowing Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 72—76.
- [32] 单毅敏, 罗兵辉, 柏振海. 5083 铝合金在 3.5% NaCl 溶液中的电化学腐蚀行为研究[J]. 铝加工, 2007: 11—14.
SHAN Yi-min, LUO Bing-hui, BAI Zhen-hai. Study on the Electrochemical Corrosion Behavior of 5083 Aluminum Alloy in 3.5% NaCl Solution[J]. Aluminum Fabrication, 2007: 11—14.
- [33] 张波, 韩冰. LF4 铝合金在海水中的腐蚀性能研究[J]. 实验与技术, 2005, 29(7): 4—7.
ZHANG Bo, HAN Bing. Corrosion Performance of LF4 Aluminum Alloy in Seawater[J]. Experiment & Technology, 2005, 29(7): 4—7.
- [34] 郑传波, 李春岭, 益帼, 等. 高强铝合金 6061 和 7075 在模拟海洋大气环境中的腐蚀行为[J]. 材料保护, 2014, 47(6): 38—41.
ZHENG Chuan-bo, LI Chun-ling, YI Jing, et al. Corrosion Behavior of 6061 and 7075 Aluminum Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Journal of Materials Protection, 2014, 47(6): 38—41.
- [35] 韩东锐, 韩冰, 隋景堂, 等. 6061 铝合金在高温流动海水中的腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2011, 8(3): 1—4.
HAN Dong-rui, HAN Bing, SUI Jing-tang, et al. Corrosion Behavior of 6061 Aluminum Alloy in High Temperature Flowing Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(3): 1—4.