

特约专栏

铝合金船舶的腐蚀防护技术现状与展望

张 波¹, 方志刚², 李向阳³, 董彩常¹

(1. 钢铁研究总院青岛海洋腐蚀研究所, 山东 青岛 266071)

(2. 海军装备研究院, 北京 100161)

(3. 中国钢研科技集团有限公司, 北京 100081)

摘 要: 针对国内外铝合金船舶的船体、空舱、海水管路系统、艉板法兰等部位的铝合金腐蚀现状进行了调研分析, 发现船体基本采用涂料+铝合金牺牲阳极的方法进行保护, 效果良好; 而空舱、海水管路系统和艉板法兰等部位, 却因防腐措施不到位分别存在一定的腐蚀问题。文章结合青岛海洋腐蚀研究所多年积累的铝合金实海腐蚀研究资料, 在对相应部位腐蚀问题客观分析的基础上, 分别对铝合金船舶的牺牲阳极阴极保护、防腐防污涂层保护、微弧氧化处理和电绝缘保护等腐蚀防护技术, 在使用过程中存在的问题以及相应应对措施进行了分析总结, 同时对铝合金船舶各项腐蚀防护技术的发展前景以及需要解决的问题进行了展望。

关键词: 船舶; 铝合金; 腐蚀; 技术现状

中图分类号: 146.2⁺1; TG174 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2014)07-0414-04

Status and Prospect of Corrosion Protection Technology about Aluminium Alloy Ship

ZHANG Bo¹, FANG Zhigang², LI Xiangyang³, DONG Caichang¹

(1. Qingdao Marine Corrosion Research Institute, Qingdao 266071, China)

(2. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China)

(3. China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, the corrosion status of aluminum alloy ship at home and abroad about the hull, the cabin, seawater pipeline, stern plate flange were analyzed through the investigation. The using of paint + aluminum alloy sacrificial anode for the hull protection had a good protective effect, but the cabin, seawater pipeline, stern plate flange had some corrosion problems because the anti-corrosion technologies were not in place. Combined with marine corrosion research data about aluminum alloy accumulated by Qingdao Marine Corrosion Research Institute, the present application problems and response measures of corrosion protection technology about aluminum alloy ship were analyzed and summarized, such as sacrificial anodes, anticorrosive and antifouling coating, microarc oxidation technology, electrical insulation technology. Thereafter, the development suggestions and the problems to be solved of corrosion protection technology about aluminum alloy ship were raised, in order to provide reference for designers, builders and users of aluminum alloy ship.

Key words: ship; aluminium alloy; corrosion; technology status

1 前 言

铝合金具有比重小、比强度大、耐海水腐蚀性好、无磁性、低温性能好等优点, 它作为结构材料在造船业日益受到重视^[1]。用铝合金作船体材料可以有效地减轻船舶的重量, 提高稳定性和航速, 增强舰艇的技术战术

性能。对于高速滑艇、水翼艇、气垫船、小水面船及一些特殊用途船, 选用铝合金尤为合适。过去的30年, 随着铝合金惰性气体焊接技术的发展, 生产成本的不断降低, 铝合金材料的优势及在海洋环境的应用不断拓展, 不仅在轻型船舶领域, 在高速快艇领域也得到了很快发展^[2-3]。

铝和铝合金化学性质很活泼, 但由于它能与氧生成致密而钝化的氧化膜, 所以耐蚀性比钢材好得多^[4-5]。当铝合金用在船舶上时, 不论是在哪个部位, 都或多或少会与海水接触, 或受到海水飞沫和海洋大气的侵袭,

收稿日期: 2014-03-28

第一作者及通讯作者: 张 波, 男, 1971年生, 高级工程师,
Email: zhangbo@qimc.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.07.05

因而受到一定的腐蚀。铝合金的腐蚀是一个很复杂的过程,既受环境影响,又与合金的性质有关。船用铝合金在海洋环境中常见的腐蚀类型有:点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、剥落腐蚀和应力腐蚀开裂等^[6]。

本文对船舶用铝合金的腐蚀现状进行了调研分析,在此基础上,结合本研究所多年积累的铝合金实海腐蚀研究资料对船舶用铝合金的腐蚀防护技术应用现状及其前景进行了分析总结,以期铝合金船的设计者、建造者和使用者提供参考。

2 铝合金船舶的腐蚀情况

海洋环境是比较严酷的环境,对处于该工作环境中的铝合金的防腐要求更高。对于船舶来说,不同部位所处的腐蚀环境不同,船底主要是受天然海水的渗透浸蚀作用和水生物的附着,水线以上部位主要是受盐雾腐蚀作用和大气老化作用。目前,铝合金船舶的腐蚀基本情况如下:①船体的腐蚀防护一般采用涂料+铝合金牺牲阳极的方法。根据对XX型艇的坞修及检查记录反映,目前使用涂料+铝合金牺牲阳极的方法防腐效果良好,艇体水线上外表面及上层建筑总体漆膜较为完整,艇体水下部分未出现明显腐蚀。涂层方面未出现大面积脱落,只有少数几艘艇涂层漆膜局部受到机械刮伤而出现局部缺陷,如图1所示。②空舱基本为裸铝,没有涂料保护设计。对几艘在坞艇的空舱检查发现,空舱舱壁普遍存在点腐蚀。空舱地板与船壳板的焊接处,普遍存在较明显的腐蚀,如图2,3所示。③铝合金管海水管路存在电偶腐蚀现象。目前,在设计中要求与铝合金管路配套的阀门、水泵、过滤器等附件均应为铝质,并且要求在所有异金属连接处进行严格的电绝缘。但调研发现,仍有部分铝合金管路与钢质管路直接相连,并未采取相应的电绝缘措施。④在某型艇的专项全面检查中发现较多艇艏板法兰有明显腐蚀,有的局部严重腐蚀甚至穿孔。个别艇的艏轴管架端部、艏封板与艏板法兰连接的螺栓孔也出现了腐蚀。其腐蚀原因是涂层在内应力和水

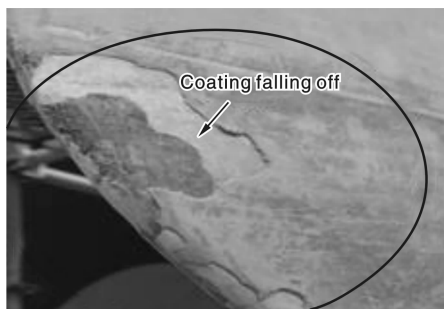


图1 某艇左片体艇体涂层脱落的照片

Fig. 1 Macrophoto of coating falling off on left piece hull of certain boat



图2 某艇5号空舱腐蚀照片

Fig. 2 Macrophoto of corrosion of 5[#] empty cabin on certain boat



图3 某艇空舱焊缝处腐蚀照片

Fig. 3 Macrophoto of corroded welding seam of empty cabin on certain boat

动力的冲刷作用下加速脱落,同时,铸铝喷泵艏板法兰与不锈钢叶轮产生电偶效应,继而形成电化学腐蚀。当具备形成冲刷条件或气蚀条件时,尾板法兰则相继产生冲刷腐蚀、空泡腐蚀和各种腐蚀叠加,直至形成穿孔。

3 船舶用铝合金腐蚀防护技术现状

3.1 牺牲阳极阴极保护

对于小型高速船,一般不采用外加电流阴极保护措施。目前国外最为普遍采用的是在艇体外板(有防腐涂层)设置牺牲阳极。铝合金本身相对钢、铜等材料来说是一种很好的牺牲阳极材料;对于铝船体,必须选用电极电位足够负的铝合金牺牲阳极来对它进行阴极保护,同时要考虑阳极具有良好的溶解特性及电位不能过负而导致铝发生碱腐蚀^[7-8]。目前,铝合金牺牲阳极材料的主要成分为Al-Zn-In-Mg-Ti;牺牲阳极使用螺栓固定,阳极中的“铁蕊”必须使用铝蕊,螺栓必须使用铝质螺栓^[9]。但根据调研情况,东海某型艇体外板Al-Zn-In-Mg-Ti牺牲阳极由于快艇上排时间过长,牺牲阳极表面的腐蚀产物经过空气暴晒和干燥作用,形成坚硬的外壳,阻碍了牺牲阳极完全发挥保护作用。

另外,目前仅有针对钢质船舶的牺牲阳极设计标准,还没有成熟的能适用于铝合金船舶牺牲阳极保护的相应标准规范和设计方法。随航速的变化,铝壳船船体

湿表面的电位分布变化很大,牺牲阳极的数量、布置位置及平均保护电流密度值都缺乏设计依据。

3.2 铝合金船用防腐防污涂料

铝合金船船底和水线以上部位所处的腐蚀环境不同,船底主要是天然海水的渗透侵蚀作用和水生物的附着,水线以上部位主要是盐雾腐蚀作用和大气老化作用,因此,船底和水线以上部位对防腐漆的要求不完全相同。

船底防腐底漆应具有优良的耐海水腐蚀性能和优异的涂层附着力,如环氧聚酰胺类底漆;而水线以上部位的底漆应具有优良的耐盐雾性能,如环氧聚酰胺类底漆、聚氨酯类底漆和氯化橡胶类底漆^[10]。尤其是环氧树脂,由于具有耐水性好、对基体附着力强、与多种涂料配套性好等优点而得到广泛应用,通过添加各种防锈颜料,可满足多种条件下的防腐要求,在配套体系中应用最为广泛,如美国海军在铝壳艇中使用的就是双组分环氧底漆(IP公司的 Interguard 264 系列、Epaint 公司的 EP Primer 1000 等)。我国海军 XX 艇的防锈底漆为 H900X 环氧防锈漆。

铝合金船水线及水线以下的船壳在海水环境中深受海生物之害,附着在船底的海生物不仅增大了阻力和额外重量,还加速铝合金的缝隙腐蚀。因此,除了要涂装防腐涂料外,还必须涂装防污涂料。早期的防污涂料采用有机锡、砷等有毒防污剂,随着环保法规的陆续出台,有机锡、砷等有毒防污剂的使用已受到限制^[11],而在含氧化亚铜的防污涂料中,由于铜与铝之间电极电位的差别,会加速铝合金船的腐蚀,因此在铝合金船上使用的防污涂料应避免氧化亚铜的出现。现在普遍应用的是环保型无锡自抛光防污涂料和低表面能防污涂料。美国海军在铝壳艇的配套涂料中使用的就是 3 组分有机硅弹性体防污涂料和不含铜以及锡的单组分自抛光防污涂料,如 IP 公司的 Intersleek 425 和 Epaint 公司的 SN-1 等。我国海军 XX 艇的防污漆为 859 长效船底防污漆,该漆不含有机锡 D. D. T 和氧化亚铜,符合国际海事组织有关控制船上使用防污涂料的国际规范。

对于水线以上的部位,面漆则应具有良好的耐大气老化性、良好的光泽保持性以及装饰性,并且与底漆具有良好的配套性,可以采用聚氨酯类面漆、醇酸类面漆、丙烯酸酯类面漆等,现在通常采用的是聚氨酯类面漆^[12]。随着对涂料性能要求的不断提高,性能优越的氟碳涂料或者环氧、丙烯酸改性的氟碳涂料也开始应用到铝合金的配套涂层体系中。

3.3 铝合金的微弧氧化处理

微弧氧化处理是近年来兴起的一种表面处理新技

术。它采用较高的能量密度,将阳极氧化工作区从法拉第区引入到高压放电区,通过电化学、热化学及等离子体化学等的共同作用,在 Al, Mg, Ti, Nd 等有色金属表面原位形成陶瓷质氧化膜^[13]。微弧氧化是阳极氧化技术的发展,其实质仍是较高电压下的阳极氧化。而与常规阳极氧化比较,微弧氧化对工件的前处理要求不苛刻,因而工件的表面状态对工艺的影响不大。铝合金微弧氧化膜同阳极氧化膜的性能比较如表 1 所示^[14]。

表 1 铝合金微弧氧化膜和阳极氧化膜比较

Table 1 Comparison of aluminum alloy microarc oxidation film and anodic oxide film

Properties	Microarc oxidation film	Anodic oxidation film
Maximum thickness/ μm	200 ~ 300	50 ~ 80
Vickers hardness/MPa	1 500 ~ 2 500	300 ~ 500
Relative pore area/%	0 ~ 40	> 40
5% Salt spray test/h	> 1 000	> 300 (close-grained $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)
Breakdown voltage/V	2 000	Low
Uniformity of the film	Uniform inside and outside surface	"Sharp edge" defect
Flexibility	Good flexibility	More brittle
Roughness	to 0.037 μm	Commonly
Microstructure of film	Containing $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ crystal phase	Amorphous structure

目前,对于铝合金船的空舱腐蚀问题,虽然涂层是解决方法之一,但由于该型船轻便快捷的结构设计要求,涂层的使用既增加了重量,又增加了消防安全隐患,因此不宜使用。空舱腐蚀是因铝材钝化膜局部受到破坏引起的,对钝化膜保护的强化是必然的方法。因此,相对于涂装而言,下一步应考虑将微弧氧化技术作为空舱主要的防护措施。

3.4 铝合金船的异种金属绝缘隔离保护技术

铝合金船虽然船体是铝材,但因各种机电设备、管路系统、舾装件等大部分是由非铝质金属构成的,而铝与非铝质金属存在电位差,较易形成电偶腐蚀^[15]。为了预防电偶腐蚀应采取措施:①相同区域或管系选用同一种耐蚀材料,如钛管钛阀、铝管铝阀,避免异种金属直接接触。②无法避免时,采取有效可靠的绝缘保护措施。无论是船体还是管系,铝合金材料与其它金属部件连接时,都要采取相对适用的绝缘措施,如环氧树脂、尼龙垫片、套筒及螺纹绝缘胶等。

4 船舶用铝合金腐蚀防护技术展望

铝合金由于具有多种优点而得到广泛的应用,随着船舶上铝合金使用部位的增多,对铝合金的防腐要求也越来越高。

(1) 铝合金船体牺牲阳极布置时应兼顾考虑船停靠码头和高速航行时两种不同的状态, 应采用模拟仿真计算和优化布置设计。根据铝合金的静态自然腐蚀稳定电位值和动态开路电位值, 以牺牲阳极材料实验数据为基础, 定量确定牺牲阳极最佳数量、布置位置及保护年限。同时, 在不同的海域, 应针对相应的海域特点使用能够有效发挥保护作用的牺牲阳极材料。

(2) 铝合金表面对涂料有其特殊要求, 选择适当的涂料和制定恰当的配套对铝合金船防腐效果至关重要。随着环保法规的陆续出台, 今后用于铝合金的防腐涂料将采用新的技术, 向着无毒、通用化、高性能的方向发展。开发新型环保、性能优异的防锈颜料是今后发展的重点。

(3) 微弧氧化技术在国内外均未进入大规模工业应用阶段, 但该技术的特点决定了其比较适用于对铝合金船的空舱腐蚀进行防护。因此, 在铝合金船舶的防腐蚀领域, 微弧氧化技术具有广泛的应用前景。

5 结 语

虽然铝合金在海洋环境中具有较好的耐蚀性, 但铝合金船在使用过程中暴露出不同以往钢质船舶的腐蚀特点和规律, 如不同海域环境和服役条件造成同样成分和规格的 Al-Zn-In-Mg-Ti 牺牲阳极对船体的保护状况不一、水下船体点蚀问题较为普遍甚至穿孔和空舱舱底积水造成严重点蚀等现象。目前, 我国海军和民用铝合金船舶的设计者和使用者也意识到了腐蚀对铝合金船的危害性和铝壳船腐蚀的独特性, 不能仅仅是将钢质船成功的防腐技术和经验照搬过来加以应用。因此, 还需针对铝合金船的具体腐蚀现状及潜在的腐蚀问题进行深入研究, 采取多种新技术、新材料、新工艺来进行有效控制, 以保障铝合金船的在役期安全性能。

同时, 铝壳船的腐蚀控制还与设计、建造、维护、修理及使用环境等密切相关, 这是一项复杂的系统工程。因此, 在加强铝合金船腐蚀防护技术重点攻关、不断提高设计和建造水平的同时, 还要进一步规范铝壳船的使用维护工作, 并完善相关维修操作规程, 进而建立腐蚀综合控制体系, 才能最终做好铝壳船的腐蚀控制工作。

参考文献 References

[1] Zhu Zufang(朱祖芳). *Corrosion Resistance and Application of Nonferrous Metals*(有色金属的耐蚀及应用)[M]. Beijing:

Chemical Industry Press, 1995: 64.

- [2] Cui Li(崔立). 铝合金舰船结构设计中相关问题探讨[J]. *Ship & Ocean Engineering*(航海工程), 2008, 37(6): 36-37.
- [3] Wu Shidong(吴始栋). 美海军开发舰船用高强度耐腐蚀铝合金[J]. *Torped Technology*(鱼雷技术), 2005, 9: 49-52.
- [4] Chen Honghai(陈鸿海). *Metal Corrosion Science*(金属腐蚀科学)[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995: 30.
- [5] Sun Qiuxia(孙秋霞). *Corrosion and Protection of Materials*(材料腐蚀和防护)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 24.
- [6] Yang Wu(杨武). *Localized Corrosion of Metal*(金属的局部腐蚀)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1995: 30.
- [7] Xu Feng(徐峰). *The Preparation and Study on the Performances of Aluminum Based Alloy Sacrificial Anodes*(铝基牺牲阳极的制备及性能研究)[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2004: 1-2.
- [8] Guo Wei(郭伟), Wen Jiuba(文九巴), Ma Jingling(马景灵). 铝合金牺牲阳极材料的研究现状[J]. *Corrosion & Protection*(腐蚀与防护), 2008, 29(8): 495-498.
- [9] Huang Yanbin(黄燕滨), Song Gaowei(宋高伟), Ding Huadong(丁华东). 两栖车辆用牺牲阳极材料研究进展[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*(装甲兵工程学院学报), 2011, 25(2): 81-84.
- [10] Jiang Jianming(蒋建明), Chen Zhengtao(陈正涛), Liu Xiyan(刘希燕). 船舶重防腐涂料的现状和发展趋势[J]. *Modern Paints and Coatings*(现代涂料与涂装), 2006, 7: 41-42.
- [11] Zhai Xiaofan(翟晓凡), Duan Jizhou(段继周). 海洋船舶无毒、低毒防污涂料的研究进展[J]. *China Coating*(中国涂料), 2012, 27(5): 11-16.
- [12] Zhang Zengping(张增平), Xu Yonghui(许永辉). 我国海军舰船涂料的现状与思考[J]. *The Navy Equipment Repair*(海军装备维修), 2009, 8(174): 10-12.
- [13] Xu Zhenming(许振明), Xu Xiaomian(徐孝勉). *Surface Treatment of Aluminum and Magnesium*(铝和镁的表面处理)[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2005: 129.
- [14] Wang Hongbin(王虹斌), Fang Zhigang(方志刚), Jiang Bailin(蒋百灵). *Microarc Oxidation Technology and Its Applications in Sea Environments*(微弧氧化技术及其在海洋环境中的应用)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 71.
- [15] Wang Hongbin(王虹斌), Fang Zhigang(方志刚). 舰船海水管系异金属电偶腐蚀的控制[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*(腐蚀科学与防护技术), 2007, 27(2): 145-147.