



国防科技图书出版基金

Corrosion Control Technology for
Aluminum Alloy Vessel

铝合金舰艇 腐蚀控制技术



方志刚 韩冰 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

铝合金舰艇腐蚀控制技术

Corrosion Control Technology for Aluminum Alloy Vessel

方志刚 韩 冰 等著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

铝合金舰艇腐蚀控制技术/方志刚等著. —北京:国防工业出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-118-09878-5

I. ①铝... II. ①方... III. ①铝合金船—军用船—防腐 IV. ①U674.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 262485 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 21 1/4 字数 327 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 96.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘

扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

人类使用船舶的历史悠久,但是采用金属制造船舶壳体的时间则短暂得多。世界上最早的铝船始于 1891 年瑞士苏黎世的 Esher Whess 公司建造的自重 450kg 的一艘小艇。100 年来,铝合金在国外的渔船、游艇制造中逐步走向广泛使用,其中最主要的原因是铝合金的比重轻和铝合金材料技术的发展。对船体结构来说,达到同等强度和在能满足船舶使用的条件下,铝合金的综合重量是钢结构的 50% 左右。同时,铝合金加工容易,耐腐蚀,耐疲劳。因此,铝合金很长一段时间是快艇等轻型船舶的首选。

在过去的 30 年,由于铝合金的焊接技术发展缓慢、防腐蚀技术难以突破,以及玻璃钢船船体可以用模型生产、造价较低的优越性,使得更轻的玻璃钢船曾经一度风行,特别是对于批量生产的船舶品种。但是,随着铝合金惰性气体焊接技术的进展,生产成本的不断降低,人们越来越重视铝合金材料的配套性及耐腐蚀性的开发,铝合金材料的优势及在海洋环境中的应用在不断拓展,不仅在轻型船舶领域,而且在高速快艇领域也崭露头角。

作为船体结构材料、设备用材和上层建筑用材,铝合金受到海水的直接腐蚀和海洋大气的腐蚀。铝合金与船舶结构制造中所应用的其他金属和合金相比,在海水中具有较负的电位,活性高,腐蚀问题复杂。目前国内外对于铝合金防腐的研究集中在大气环境下使用条件,对在海洋环境下使用的船用铝合金的防腐研究较少。对于铝合金船舶的腐蚀防护来说,虽然可以使用有些与钢铁船舶类同的防护方法,但应该指出,相对于钢制船舶的腐蚀防护,铝合金船舶腐蚀控制难度大、类型特殊、问题更为突出。主要原因是在人们关于设备和材料配套方面将重点依然放在钢质舰艇上,铝合金船体的设备和材料配套供应相对困难,总体设计者在设备和材料配套选型方面可选择的范围要小很多;另一方面,由于不同材质的结构、设备和配套使用,带来的问题是防腐蚀难度加大,所要采取的防腐蚀措施要多很多。铝合金在海水或海洋大气环境中有较严重的接触腐蚀和缝隙腐蚀倾向;维护保养要求高,铝船不能和钢制栈桥及钢制的海洋浮桥或码头设备相互有电接触,不能停泊在铜质构件附近,甚至不能停泊或停放在正在对钢板进行打磨喷砂的施工作业现场附近。所以,现实中的铝合金船舶的腐蚀防护问题依然严峻。相比较民用船舶而言,由于电子武器装备数量多并在船的总造价

中占有的比例大、设备基座材料体系更为复杂、在航率低等,铝合金舰艇的防腐蚀问题研究更显得急需并具有特殊性。

由于铝合金材料发展较快,相应地有关铝合金船舶的腐蚀防护技术研究正在快速发展过程之中,铝合金船舶的工艺及腐蚀数据都比较缺乏,铝合金船舶的设计、建造和使用一直处在不断探索和完善的过程中。因此铝合金船舶在海洋环境下的腐蚀防护资料很少,更没有针对铝质船舶的防腐蚀设计、研制和保障的书籍。在我国,民用铝合金船舶多为进口,用于建造船体结构的主要铝合金材料如 5083、6061 等的性能和生产水平与国外尚有一定的差距,围绕着如何满足建造高性能铝合金舰艇的需求来研究铝合金及其配套材料的海水腐蚀相关问题,近 30 年来国内的研究者们进行了一定的研究,但可用的数据和参考资料、文献依然很少。

随着我国铝合金船舶特别是铝合金舰艇种类、数量的增多,必须对铝合金舰艇的防腐蚀问题加以重视。因此,在设计、建造好一型铝合金舰艇以后,维护、保养、维修过程中的防腐蚀工作也是必不可少的,普及铝合金防腐蚀基础知识、把握关键环节、避免低级失误、搞好全过程全寿命的防腐蚀非常重要。一本针对铝合金舰艇防腐蚀工作的结合理论和实际的专著,成为我们装备工作中的急需。

本书由方志刚、韩冰主编,由方志刚统稿。全书共分为 10 章。第 1 章概论,由方志刚编写;第 2 章铝合金舰艇的使用环境,由管勇、方志刚编写;第 3 章腐蚀试验,由韩冰、董彩常编写;第 4 章铝合金舰艇常用材料腐蚀特性,由张波、韩冰、黄桂桥编写;第 5 章铝合金表面防护,由刘斌、方志刚、管勇编写;第 6 章电化学保护与设计,由董彩常、张波、方志刚编写;第 7 章铝合金艇涂料与涂装,由曹京宜编写;第 8 章铝合金舰艇防腐蚀结构设计,由方志刚、黎理胜编写;第 9 章制造过程中的腐蚀防护与控制,由管勇、方志刚编写;第 10 章铝合金舰艇防腐蚀系统的维护与修理,由方志刚、王涛、黎理胜编写。

本书综合了作者以及国内外近年来铝合金船舶在海水中腐蚀与防护的理论和研究成果编写而成。在前后十余年几个阶段的研究过程中,得到了王虹斌研究员、陈光章研究员、陈学群教授的参与、指导和诸多帮助,也得到了姜义庆部长、田正东高工等的大力支持,在此一并表示感谢。本书编写目的是为铝合金舰艇设计、建造、使用、维护保养和修理人员提供一本基础性书籍,可供非材料专业学生作为教材使用,也可为舰艇装备工作者和其他领域腐蚀防护专业人员提供参考。

舰艇腐蚀控制技术涉及面非常广,是一项庞大的系统工程。相对常规的钢质舰船,铝合金舰艇更具有特殊性,受篇幅所限,许多方法和措施不能一一详述。由于水平有限,书中不足在所难免,敬请读者批评指正。

作者
2014 年 7 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 概述	1
1.2 舰艇腐蚀常见类型	9
1.3 舰艇腐蚀原因分析	18
1.4 铝合金舰艇常见的腐蚀类型	20
1.5 船舶海生物污损	24
第 2 章 铝合金舰艇的使用环境	27
2.1 我国舰艇的使用海域环境	27
2.1.1 我国沿海特征环境腐蚀因素	28
2.1.2 我国海区的自然特征	36
2.2 舰艇自身腐蚀环境	44
2.2.1 船体水线下区域腐蚀	44
2.2.2 船体水线区腐蚀	45
2.2.3 船体水线上结构腐蚀	46
2.2.4 船体内部舱室腐蚀	46
2.2.5 船舶管路腐蚀	47
2.2.6 船舶的异常腐蚀——杂散电流腐蚀	49
第 3 章 腐蚀试验	51
3.1 概述	51
3.2 腐蚀试验方法	51
3.2.1 实验室试验	51
3.2.2 现场试验	54
3.2.3 实船试验	55
3.3 腐蚀试验结果处理与评定	56

3.3.1	常用腐蚀评定方法	56
3.3.2	腐蚀评定指标选择	65
3.4	典型腐蚀试验实施	67
3.4.1	电化学测试试验	67
3.4.2	实验室腐蚀试验	71
3.4.3	局部腐蚀试验	76
3.4.4	加速腐蚀试验	79
3.4.5	自然环境中的腐蚀试验	81
第4章	铝合金舰艇常用材料腐蚀特性	87
4.1	概述	87
4.2	铝合金材料的腐蚀特性	87
4.2.1	铝合金在海水中的腐蚀类型	88
4.2.2	铝合金在海洋环境中的自然腐蚀	95
4.3	金属材料在舰艇上的匹配原则	108
4.3.1	不同金属自然腐蚀电位和电偶序	109
4.3.2	铝合金在静态海水中的电偶腐蚀	112
4.3.3	铝合金动态海水中的电偶电流	118
4.3.4	铝合金匹配选择结论	122
第5章	铝合金表面防护	123
5.1	铝合金表面防护体系	123
5.1.1	铝合金表面氧化膜	124
5.1.2	铝合金预处理典型形式	124
5.1.3	铝合金表面处理典型形式	128
5.2	金属覆盖层	128
5.2.1	铝合金电镀	128
5.2.2	铝合金化学镀	135
5.2.3	铝合金热喷涂	137
5.3	化学覆盖层	139
5.3.1	化学转化	139
5.3.2	磷化处理	144
5.4	阳极氧化	151
5.4.1	阳极氧化原理	151

5.4.2	阳极氧化的种类	151
5.4.3	阳极氧化膜的结构、性质与应用	152
5.4.4	阳极氧化膜的封孔处理	153
5.4.5	阳极氧化膜的检验	155
5.4.6	普通阳极氧化	157
5.4.7	硬质阳极氧化	158
5.4.8	微弧氧化	159
5.4.9	氧化工艺在船舶上的应用	162
5.5	防锈剂	169
5.5.1	酸性介质中铝用缓蚀剂	170
5.5.2	碱性介质中铝用缓蚀剂	171
5.5.3	脱水型防锈剂	171
5.6	衬塑与涂塑	172
第6章	电化学保护与设计	174
6.1	概述	174
6.2	铝合金在海水中的电化学特性	174
6.2.1	铝合金在静态海水中的腐蚀电位	174
6.2.2	铝合金在动态海水中的腐蚀电位	177
6.2.3	铝合金在海水中的极化曲线	178
6.3	铝合金牺牲阳极	180
6.3.1	铝锌镉镁钛阳极产物分析	180
6.3.2	阳极改性与电化学性能测试	181
6.3.3	牺牲阳极室内模拟干湿交替试验	183
6.3.4	结论	185
6.4	船体牺牲阳极保护设计	186
6.4.1	防腐涂层不完整率的表现形式	186
6.4.2	设置牺牲阳极的数学模型	188
6.4.3	仿真计算中考虑的基本因素	191
6.5	管路阴极保护	193
6.5.1	铝合金船舶用管系材料	193
6.5.2	铝质管系的阴极防护	195
6.6	铝合金船舶喷水推进流道系统电解防污	198
6.6.1	保护电位范围	200
6.6.2	保护电流量	200
6.6.3	防腐防污保护系统	201

6.6.4	海水流道电解防污技术方案	205
6.6.5	电解防污效果	206
6.6.6	有效氯技术对铝合金管道腐蚀的影响	207
6.7	船舶内舱舱底的阴极保护	210
6.7.1	铝质舱底板及铝质管道专用牺牲阳极	211
6.7.2	内舱舱底的牺牲阳极保护	212
第7章	铝合金艇涂料与涂装	215
7.1	概述	215
7.1.1	涂料的组成	215
7.1.2	涂料的作用	216
7.1.3	涂料的发展和要求	217
7.2	涂料选择与配套	217
7.2.1	涂料的选择	217
7.2.2	涂料的配套	219
7.2.3	涂料的使用寿命	230
7.3	涂装前表面处理方法	230
7.3.1	水线以下区域	231
7.3.2	干舷、上层建筑等区域	232
7.4	涂装方法与涂装管理	233
7.4.1	涂装管理与控制	233
7.4.2	铝艇专用涂料及涂装方法	241
7.4.3	艇底涂装方案与实施步骤	244
7.4.4	迷彩船壳涂料涂装程序及要求	247
7.4.5	防滑甲板涂料涂装程序及要求	248
7.4.6	新坞修艇涂装应注意问题	250
第8章	铝合金舰艇防腐蚀结构设计	251
8.1	常用防腐蚀设计方法	251
8.2	铝合金船体的防腐蚀措施及实施	255
8.3	设计过程中防腐蚀工作	258
8.4	异种金属构件连接部位防止电偶腐蚀的设计	259
第9章	制造过程中的腐蚀防护与控制	262
9.1	一般原则	262

9.2	选材和设计过程中的腐蚀防护与控制	262
9.2.1	正确选材	262
9.2.2	合理设计	264
9.3	加工制造过程中的腐蚀防护与控制	270
9.3.1	冷加工	270
9.3.2	热加工	271
9.4	安装、运行及维修保养过程中的腐蚀防护与控制	272
9.4.1	安装	272
9.4.2	运行	273
9.4.3	维护保养	273
9.4.4	贮存运输	273
第 10 章	铝合金舰艇防腐系统的维护与修理	274
10.1	腐蚀监测、检测、检查	274
10.1.1	概述	274
10.1.2	腐蚀检测和检查的方法	275
10.2	铝合金舰艇腐蚀性检查重点部位及方法	279
10.3	腐蚀环境监测和电位检测	299
10.3.1	腐蚀环境监测	299
10.3.2	腐蚀电位监测	301
10.4	防腐蚀维护保养及修理	307
10.4.1	铝合金舰艇维护保养过程中的防腐蚀要点和方法	307
10.4.2	铝合金舰艇修理过程中的防腐蚀重点	307
10.4.3	铝合金艇的维修环境	308
10.4.4	典型的防止异种金属接触腐蚀措施的修复要求	308
10.4.5	铝合金艇上牺牲阳极的更换	310
10.4.6	典型铝合金舰艇船体腐蚀损伤常见部位	311
10.4.7	管路及附件的维护保养	312
10.4.8	喷泵推进装置的维护保养	313
10.4.9	齿轮箱的维护保养	315
10.4.10	柴油机的维护保养	316
10.4.11	舱底的清洁	316
参考文献		318

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Summary	1
1.2 Common corrosion of the vessel	9
1.3 Vessel corrosion reason analysis	18
1.4 Typical corrosion forms of aluminum alloy vessel	20
1.5 Biofouling of the vessel	24
Chapter 2 Service environment of aluminum alloy vessel	27
2.1 Offshore service environment of Chinese vessels	27
2.1.1 Characteristic environment corrosion factors in coastal areas of China	28
2.1.2 Sea area natural features of China	36
2.2 Internal corrosion environment of the vessels	44
2.2.1 Underwater hull corrosion	44
2.2.2 Hull waterline zone corrosion	45
2.2.3 Hull construction corrosion above waterline	46
2.2.4 Interior tanks corrosion	46
2.2.5 Vessel pipeline system corrosion	47
2.2.6 Abnormal corrosion of vessel – spurious current corrosion	49
Chapter 3 Corrosion tests	51
3.1 Summary	51
3.2 Corrosion testing methods	51
3.2.1 Laboratory test	51
3.2.2 Field test	54
3.2.3 Full – scale test	55
3.3 Corrosion testing results processing and assessment	56
3.3.1 Common corrosion assessment methods	56
3.3.2 Corrosion assessment selection	65
3.4 Typical corrosion tests	67
3.4.1 Electrochemical measurements	67

3.4.2	Laboratory corrosion testing	71
3.4.3	Local corrosion tests	76
3.4.4	Accelerated corrosion tests	79
3.4.5	Natural environment corrosion tests	81
Chapter 4 Corrosion character of conventional materials for		
	aluminum alloy vessel	87
4.1	Summary	87
4.2	Corrosion character of aluminum alloys	87
4.2.1	Seawater corrosion types of aluminum alloy	88
4.2.2	Natural corrosion of aluminum alloy in marine environment	95
4.3	Matching principle of the marine metal materials	108
4.3.1	Natural corrosion galvanic series of different metals	109
4.3.2	Galvanic corrosion of aluminum alloy in the static seawater	112
4.3.3	Galvanic current of aluminum alloy in the flowing seawater	118
4.3.4	Aluminum alloy matching and selection conclusion	122
Chapter 5 Surface protection of aluminum alloys		
5.1	Surface protection system of aluminum alloy	123
5.1.1	Oxide film of aluminum alloy	124
5.1.2	Typical pretreatment forms of aluminum alloy	124
5.1.3	Typical surface treatment forms of aluminum alloy	128
5.2	Metal coating	128
5.2.1	Aluminum alloy electroplating	128
5.2.2	Aluminum alloy electroless plating	135
5.2.3	Aluminum alloy thermal spraying	137
5.3	Chemical coating	139
5.3.1	Chemical conversion	139
5.3.2	Phosphating	144
5.4	Anodizing	151
5.4.1	Anodic oxidation theory	151
5.4.2	Anodic oxidation types	151
5.4.3	Structure, character and application of anodic oxide film	152
5.4.4	Sealing of anodic oxide film	153
5.4.5	Inspection of anodic oxide film	155
5.4.6	Conventional anodic oxidation	157

5.4.7	Hard anodic oxidation	158
5.4.8	Micro – arc oxidation	159
5.4.9	Application of oxidation process in ship	162
5.5	Anti – corrosion composition	169
5.5.1	Corrosion inhibitor of aluminum alloy in acidic medium	170
5.5.2	Corrosion inhibitor of aluminum alloy in base medium	171
5.5.3	Water displacement anti – corrosion composition	171
5.6	Plasticlining and plasticcoating	172
Chapter 6 Electrochemical protection and design		174
6.1	Summary	174
6.2	Electrochemical characters of aluminum alloy in seawater	174
6.2.1	Corrosion potentials of aluminum alloy in static seawater	174
6.2.2	Corrosion potentials of aluminum alloy in flowing seawater	177
6.2.3	Polarization curves of aluminum alloy in seawater	178
6.3	Aluminum alloys sacrificial anode	180
6.3.1	Analysis of Al – Zn – In – Mg – Ti anode corrosion products	180
6.3.2	Anode modification and electrochemical performance measurement	181
6.3.3	Alternate wetting and drying laboratory simulation test of sacrificial anode	183
6.3.4	Conclusion	185
6.4	Hull sacrificial anode protection	186
6.4.1	Incomplete rate manifestation of anticorrosive coating	186
6.4.2	Sacrificial anode mathematical modeling	188
6.4.3	Basic consideration of simulating calculation	191
6.5	Cathodic protection for pipeline	193
6.5.1	Pipeline materials of aluminum alloy vessels	193
6.5.2	Aluminum pipeline system cathodic protection	195
6.6	Electrolysis anti – fouling of aluminum alloy vessel water jet propulsion channel system	198
6.6.1	Range of protective potential	200
6.6.2	Protective amperage	200

6.6.3	Anticorrosion and antifouling system	201
6.6.4	Seawater channel electrolysis antifouling technical proposal	205
6.6.5	Electrolysis antifouling effect	206
6.6.6	Effect of available chlorine technology on aluminum pipeline	207
6.7	Cathodic protection for interior tank bottom	210
6.7.1	Dedicated sacrificial anode for aluminum tank ceiling board and pipeline	211
6.7.2	Interior tank bottom sacrificial anode protection	212
Chapter 7	Paint and painting of aluminum alloy vessel	215
7.1	Summary	215
7.1.1	The composition of the coatings	215
7.1.2	The effects of coatings	216
7.1.3	The requirement and development of coatings	217
7.2	Coating selection and matching	217
7.2.1	Paint selection	217
7.2.2	Paint matching	219
7.2.3	The service life of the coating	230
7.3	Surface preparation methods	230
7.3.1	Underwater zone	231
7.3.2	Freeboard and topside	232
7.4	Coating process and management	233
7.4.1	Painting management and control	233
7.4.2	Dedicated paint and painting method for aluminum vessels	241
7.4.3	Vessel bottom painting scheme and implementation steps	244
7.4.4	Camouflage hull painting scheme and requirement	247
7.4.5	Non – skid deck paint coating scheme and requirement	248
7.4.6	Attention to the painting of newly docking – repaired vessel	250
Chapter 8	Aluminum alloy vessel structural design for corrosion prevention	251
8.1	Common anti – corrosion design methods	251
8.2	Measures and implements for corrosion prevention of	