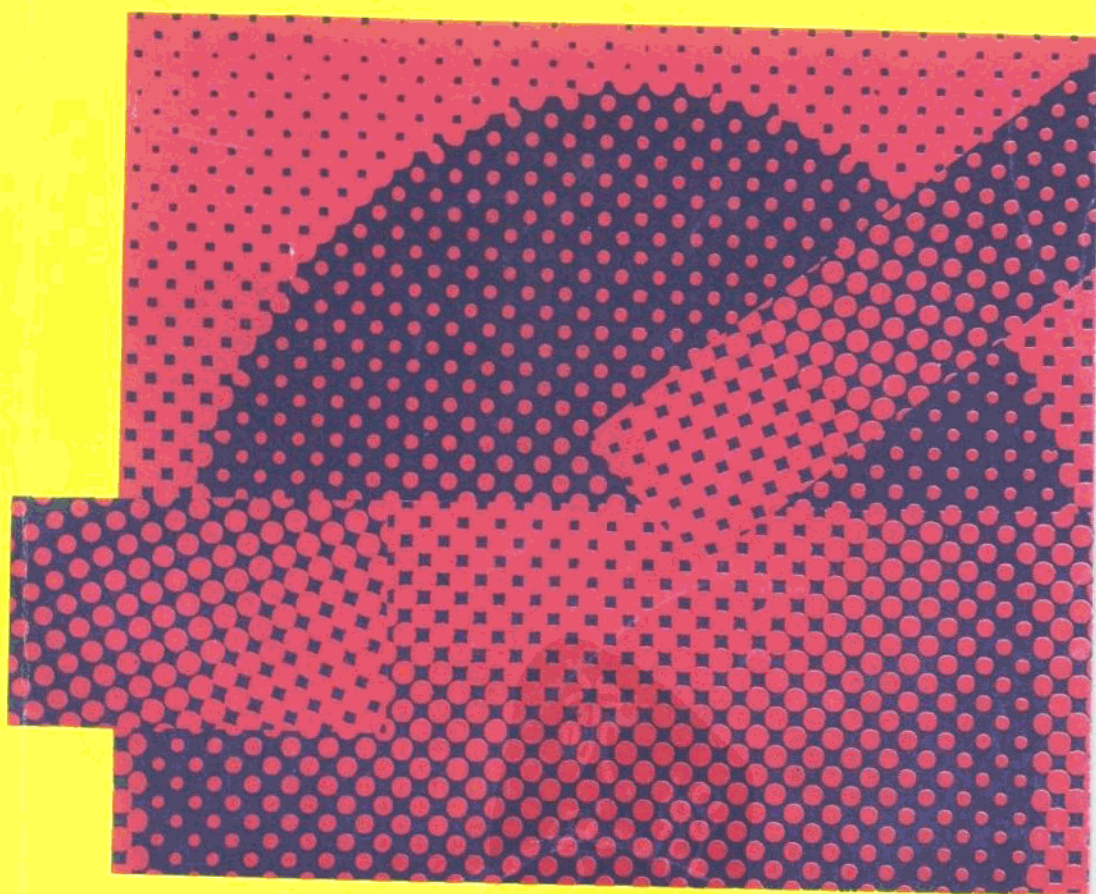


船舶及海洋工程结构物的 腐蚀与防护

夏炳仁 编

大连海运学院出版社



U 672.7

X=7

413472

全国高等学校教材

船舶及海洋工程结构物的 腐蚀与防护

夏炳仁 编

李 平 审



大连海运学院出版社

(辽)新登字 11 号

DW93/13

图书在版编目(CIP)数据

船舶及海洋工程结构物的腐蚀与防护/夏炳仁编. —大连:大连
海运学院出版社, 1993

ISBN 7-5632-0630-2

I. 船…

I. 夏…

II. ①船舶—腐蚀②船舶—金属表面保护③海洋工程—腐蚀

④海洋工程—金属表面保护

N. U672.7-43

大连海运学院出版社出版

(大 连)

大连海运学院出版社印刷厂印刷 大连海运学院出版社发行

1993 年 12 月第 1 版 1993 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 17.25 字数: 431 千

印数: 0001—1500 定价: 7.90 元

内 容 提 要

本书论述了金属电化学腐蚀与防护的基本原理;介绍了常用金属材料在海洋环境条件下的腐蚀规律和耐腐蚀特性;总结了我国近 30 年来船舶及海洋工程结构物腐蚀与防护方面的科研成果和实际应用经验;详细阐明了各项防护措施。着重研究了牺牲阳极保护、外加电流阴极保护、涂料涂层保护各系统的组成、工作原理、所用材料性能、组件结构、装置特性、工作参数和设计方法,并给出了许多设计和实船应用实例。介绍了船舶电腐蚀产生的原因和防蚀方法,结构材料选择和结构防蚀设计。本书还比较系统地介绍了国外有关技术资料和设计实例,内容丰富,文字通俗易懂,深入浅出,理论联系实际,有很大实用价值。

本书作为船舶工程类专业教材,也可作为船舶、海洋工程、海上运输、化工、冶金、石油等工程中科研、设计、施工技术人员的参考书。

前 言

船舶及海洋工程结构物在海洋环境条件下的腐蚀和海生物污损是非常严重的,危害也非常之大,学会与腐蚀危害作斗争,控制与防止腐蚀,具有重大的社会意义和经济效益,是从事船舶及海洋工程结构科研、设计、制造、开发及海上运输方面工程技术人员责任。

本书就是为上述人员的后备军,船舶及海洋工程专业的大学生而编写的教材。全书共 11 章。前 5 章讲述金属腐蚀与防护的基本原理,常用金属材料在海洋环境条件下腐蚀的基本规律、影响因素及腐蚀试验方法。后 6 章分别介绍船舶及海洋工程结构的腐蚀控制措施,着重介绍牺牲阳极保护法、外加电流阴极保护法和涂料涂装保护法,同时还介绍了杂散电流腐蚀和结构设计时防止腐蚀的措施。

培养工程技术人员,传授其专门应用技术,理论知识固然重要,更重要的还在于应用。理论与实际应用之间的桥梁是方法。在编写本书时刻意在讲述理论之后,密切结合实际,介绍各种应用方法,达到学以致用目的。运用方法的好坏在于能力,为此,书中介绍了许多国内外有关的科研、设计、应用等方面资料,以丰富专业知识,扩大眼界,启迪思路,达到培养和提高解决问题和分析问题的能力。

本书经全国 9 所设有船舶工程专业各院校有关专家的评审,1991 年 7 月在哈尔滨召开的全国船舶工程教材委员会会议审定,作为船舶工程专业教材出版发行。编者根据评审意见,在原有讲义基础上编写而成。镇江船舶学院李平副教授对教材进行了全面审阅,提出了许多宝贵意见和建议。在此表示衷心的感谢。

由于编者的经验和知识水平所限,书中难免有不妥之处,恳切希望专家和广大读者批评指正。

夏炳仁

1992 年 9 月于武汉

目 录

第一章 绪论	1
第一节 金属腐蚀的基本概念.....	1
第二节 金属腐蚀的分类及破坏形式.....	1
第三节 防止和控制金属腐蚀的措施.....	4
第四节 研究金属腐蚀与防护的重要意义.....	5
第五节 海水腐蚀、海生物污损与船舶营运经济性	5
第二章 金属电化学腐蚀原理	9
第一节 电化学腐蚀原理.....	9
第二节 金属的电极电位	11
第三节 电极的极化作用	14
第四节 电极的去极化作用	18
第五节 金属的钝化	20
第六节 金属腐蚀图($E-pH$ 图)	22
第七节 影响金属电化学腐蚀的因素	24
第三章 金属在海洋环境中的腐蚀	27
第一节 海水的性质及海水腐蚀特点	27
第二节 钢铁在海水中的腐蚀过程和腐蚀产物	29
第三节 海洋大气的特性及其腐蚀过程	31
第四节 金属腐蚀试验方法及腐蚀程度的评定	34
第四章 金属在海洋环境中的耐蚀性	38
第一节 钢铁材料在海洋环境中的腐蚀	38
第二节 不锈钢在海洋环境中的腐蚀	48
第三节 铜及铜合金在海洋环境中的腐蚀	50
第四节 铜合金螺旋桨的腐蚀	53
第五章 金属的电化学保护原理	56
第一节 阴极保护原理	56
第二节 阴极保护的分类	57
第三节 阴极保护中的电流遮蔽作用	60
第四节 阴极保护的主要参数	62
第五节 阴极保护系统的设计计算	65
第六章 牺牲阳极保护	71
第一节 概述	71
第二节 镁合金阳极	73
第三节 纯锌与锌合金阳极	75
第四节 铝合金阳极	77

第五节	各种牺牲阳极材料性能比较	81
第六节	船舶牺牲阳极保护设计	82
第七节	保护效果的检查评定	88
第八节	船体电位测量方法和测量仪表	90
第九节	牺牲阳极实船试验研究和应用	91
第十节	国外牺牲阳极材料简介	93
第七章	外加电流阴极保护	98
第一节	概述	98
第二节	自动控制直流电源——自动恒电位仪	99
第三节	辅助阳极	100
第四节	阳极绝缘屏	106
第五节	参比电极	108
第六节	推进器轴系和舵接地装置	112
第七节	外加电流阴极保护系统设计计算	113
第八节	外加电流阴极保护系统设计和应用实例	120
第九节	国外舰船外加电流阴极保护应用概况	126
第八章	电腐蚀及其防护措施	139
第一节	电腐蚀概况	139
第二节	电腐蚀的产生原因	140
第三节	电腐蚀的防止措施	141
第九章	船舶防蚀涂料	143
第一节	防蚀涂料概述	143
第二节	涂料的防蚀原理	147
第三节	涂料的基本组成	148
第四节	车间底漆	155
第五节	船底防锈漆	159
第六节	船底防污漆	164
第七节	船舶水线以上部位防锈漆	168
第八节	水线漆	169
第九节	船壳漆	170
第十节	甲板漆	171
第十一节	船舱漆	171
第十二节	水舱漆、油舱漆	171
第十三节	石油及化学品运输船液货舱涂料涂装	172
第十四节	新型船舶漆的发展与应用	174
第十五节	船舶涂装设计	177
第十章	海洋工程结构的腐蚀与保护	189
第一节	海洋平台结构的腐蚀	189
第二节	海洋工程钢结构防蚀方法简介	193

第三节	海洋平台阴极保护的参数选择	196
第四节	海洋平台牺牲阳极保护	198
第五节	海洋平台外加电流保护	201
第六节	海洋平台混合阴极保护	203
第七节	海洋平台阴极保护设计	204
第八节	海洋平台常用涂料及其涂装	211
第九节	海洋平台飞溅区和潮差区的特殊防蚀措施	213
第十一章	正确选用金属材料、合理设计金属结构	217
第一节	正确选用金属结构材料	217
第二节	合理设计金属结构	218
附录一	船舶漆新、旧名称对照表	221
附录二	各国船舶涂料型号(牌号)对照表	224
附录三	船舶涂料品种	227
附录四	我国船舶常用涂装规格	250
附录五	日本船体涂装规格	253
参考文献		259

第一章 绪 论

第一节 金属腐蚀的基本概念

金属材料是现代最为重要的工程材料。它们的强度高、塑性好、耐磨损、耐腐蚀,具有良好的导热性和导电性及某些特殊的物理性能。此外,它们还有良好的铸造、焊接、机加工等工艺性能。可以毫不夸张地说,人类社会的发展和科学技术的进步与金属材料的使用有着极为密切的关系。

但是,我们也应看到,金属腐蚀现象是非常普遍的。所谓金属腐蚀,是指金属与周围环境介质之间发生的化学作用或电化学作用而引起的变质或者破坏。

从热力学的观点出发,除了少数贵金属(Au、Pt等)外,一般钢铁及多数金属都处于热力学不稳定状态,有自发产生腐蚀的倾向。轧钢过程中氧化铁皮的形成,船体钢板及码头钢桩的锈蚀,地下输油管道的穿孔,都是金属腐蚀极为常见的例子。

大家都知道,金属材料制件都有一定的使用寿命,随着使用时间的延长,它们将受到不同形式直接或间接的损坏。金属结构材料的损坏形式是多种多样的,但最重要最常见的损坏形式是断裂、磨损和腐蚀。

断裂是指金属构件受力超过弹性极限、塑性极限而最终的破坏。磨损是指金属制作和其它制件相互作用,由于机械摩擦而引起的逐渐损坏。腐蚀,如上所述,是金属制件在周围环境介质的作用下,逐渐发生的损坏或变质现象。腐蚀与磨损有差别,前者有腐蚀产物,后者没有新的物质生成。但有时两者会同时发生,如船舶在江河的浅水区航行,螺旋桨受到流砂冲刷磨损,同时由于电化学作用和空泡现象使螺旋桨产生腐蚀。

在金属材料制件的各种损坏形式中,金属腐蚀损坏引起了船舶及海洋工程界的特别关注。因为船舶及海洋工程结构物在海洋的自然环境中,金属腐蚀格外严重,其危害也特别巨大。因此,对船舶及海洋工程结构物腐蚀规律的研究,并制定出有效的防护措施显得十分重要。

第二节 金属腐蚀的分类及破坏形式

一、金属腐蚀的分类

金属腐蚀按腐蚀过程中的作用机理可分为四大类:化学腐蚀、电化学腐蚀、在机械因素作用下的腐蚀和生物腐蚀,详细分类见图1-1。

1. 化学腐蚀

化学腐蚀是指金属与腐蚀介质直接发生反应,使金属表面状态受到破坏。特点是在反应过程中没有电流产生。金属和不导电的液体(非电解质)或干燥的气体相互作用是化学腐蚀的典型例子。

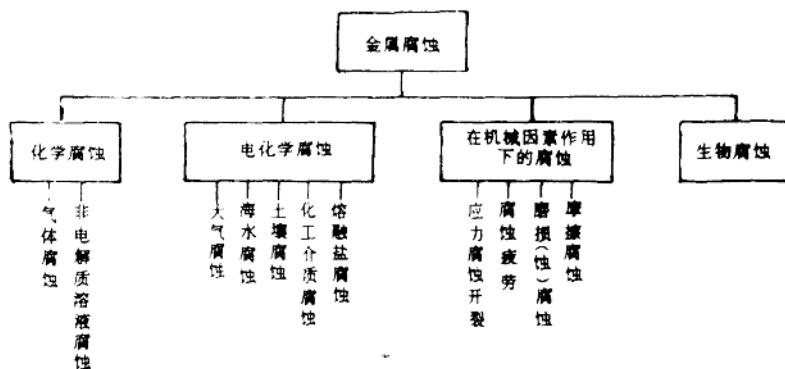


图 1-1 金属腐蚀分类图

2. 电化学腐蚀

电化学腐蚀是指金属与电解质溶液(如潮湿的大气、海水、电解质水溶液等)发生电化学反应,在反应过程中有电流产生。

电化学腐蚀是最常见的腐蚀形式,常见的有:

(1)大气腐蚀 金属在潮湿的大气中,其表面形成水膜或凝结水而引起的腐蚀,根据条件不同又可分为海洋大气、工业大气、城市大气和乡村大气等不同腐蚀过程。海船及海洋工程结构发生海洋大气腐蚀主要在水面以上部分及内部结构,特别是在低温下由海水或空气从外面冷却的内表面腐蚀更为严重。

(2)海水腐蚀 海水含有多种盐类成分,具有导电性,属腐蚀性电解质。船体及海洋工程结构物水下部分壳体外表面的腐蚀,进水管内表面的腐蚀都属于海水腐蚀。海水腐蚀又可分为全浸、局部浸入及间浸条件下的腐蚀。

(3)土壤腐蚀 潮湿的土壤中也含有多种盐类成分,也具有导电性。埋在地下的金属结构物,如输油管道、地下电缆等的腐蚀都属于土壤腐蚀。

(4)化工介质腐蚀 金属在酸、碱、盐溶液中的腐蚀属化工介质中的腐蚀。

3. 机械因素作用下的腐蚀

在机械因素作用下的腐蚀是指金属结构或制件在腐蚀介质和机械因素联合作用下遭到的加速破坏。联合因素往往比单个因素分别作用后叠加起来还要严重得多。根据机械作用因素的性质,可将这类腐蚀分为:

(1)应力腐蚀开裂 指金属构件在内外拉应力和特定腐蚀介质共同作用下出现的脆性开裂。

(2)腐蚀疲劳 指处于腐蚀介质中的构件在循环应力作用下发生的开裂。

(3)摩擦磨损腐蚀 指处于腐蚀介质中的构件在受强烈冲刷磨损或表面相互摩擦而导致构件的损坏。

4. 生物腐蚀

生物腐蚀是在金属表面有某些微生物,由于微生物生命活动产物的作用而发生腐蚀。微生物进行代谢时能产生各种化学物质。如硫细菌在有氧条件下能使硫或硫化物氧化,反应最终将产生硫酸;再加硫酸盐还原菌在通气性差的海水和土壤中可将硫酸盐还原或单质硫或分解含

硫有机物产生硫化氢,从而加速金属在电解质溶液中的腐蚀。

二、金属腐蚀的破坏形式

按照金属腐蚀的破坏形式,可将腐蚀分为两大类:全面腐蚀和局部腐蚀。全面腐蚀是遍布金属结构或构件的整个表面的腐蚀破坏。局部腐蚀仅发生在受腐蚀介质作用的金属表面上的个别地方,而其他大部分地方基本上不腐蚀。

全面腐蚀和各种局部腐蚀破坏的形式如图 1-2 所示。



图 1-2 金属腐蚀的破坏形式

全面腐蚀可以是均匀的,也可以是不均匀的。它是一种危险性较小的腐蚀,在设计时比较容易控制。当确定船舶寿命或其他金属结构使用年限,并了解金属材料在特定腐蚀介质中的均匀腐蚀速度,算出相应使用年限下的腐蚀裕量,使结构增加一定数值的腐蚀裕量满足使用要求。但是船舶及其他金属结构实际上更多的是发生不均匀腐蚀和局部腐蚀。

不均匀腐蚀常又可分为:

- (1)斑状腐蚀 腐蚀像斑点一样分布于金属表面上,所占面积较大,但不很深。
- (2)溃疡腐蚀 在有限的金属表面上集中了较大较深的蚀坑,形如溃疡状。

以上两种腐蚀形态开始发生在漆膜局部损坏的金属表面较小区域,随着时间的延长,腐蚀面积逐步扩大,最终连成一片,形成不均匀腐蚀。

局部腐蚀破坏的形态较多,对船舶及金属结构的危害也比全面腐蚀大得多。局部腐蚀主要有如下几种:

- (1)点蚀 在金属表面的某些部分由于腐蚀而形成一些小而深的圆孔,严重时甚至穿孔,故又称为孔蚀。船舶及海洋工程结构物在遭受电腐蚀时,在杂散电流的流出区域容易发生点蚀。
- (2)缝隙腐蚀 金属构件通常都采用铆接、螺钉连接或焊接等方式进行连接,在连接部位就可能出现缝隙。缝隙中的金属在电解质溶液中发生强烈地腐蚀,使金属结构过早地损坏。
- (3)选择性腐蚀 多元合金在腐蚀介质中某一组分优先溶解,而造成另一组分富集在合金表面。铸造的黄铜螺旋桨在海水中脱锌腐蚀便是选择性腐蚀的典型例子。
- (4)晶间腐蚀 腐蚀破坏沿着金属晶粒边界发展,使晶粒之间失去结合力,金属强度大大降低,乃至破坏。易发生晶间腐蚀的金属材料有不锈钢、硬铝、镍基合金及镁合金等。
- (5)穿晶腐蚀 腐蚀裂纹由金属表面向内部扩展时可穿过晶粒本身的一种特殊局部腐蚀。穿晶腐蚀破坏不易察觉,一般也没有预兆,具有突然破坏的性质。奥氏体不锈钢,某些铝合金和铜合金易发生穿晶腐蚀破坏。
- (6)表面下腐蚀 这类腐蚀开始发生在金属表面个别点上,然后在表面下进一步扩展,沿着与表面平行的晶界进行。由于腐蚀产物的体积大于原金属的体积,而使金属局部表面鼓胀或分层剥落。某些铝合金、不锈钢型材或板材表面和用贱金属涂层保护的金属表面可能发生这类

腐蚀。

第三节 防止和控制金属腐蚀的措施

人类差不多在使用金属材料的同时,就开始与腐蚀现象作斗争,也就是从使用金属材料起,人们就开始了防腐蚀技术的研究。我们的祖先在防腐蚀技术方面作出卓越的贡献。早在公元前三世纪,我国已采用金汞齐镀金技术在金属表面上镀金,以增加美观,同时达到防腐蚀的目的。从我国秦始皇陵墓中出土的青铜剑,有的至今毫无锈蚀。这就说明早在两千多年前我国劳动人民就创造了与现代相似的防蚀技术。实践中,我国从远古就使用各类植物油漆进行表面涂层以防止腐蚀,此法沿用至今。

随着工业、农业和科学技术的发展,防腐技术也不断地获得了新的进步,根据工业生产的需要,发展了各类金属镀层,从比较经典的电镀、热浸镀发展到金属喷镀、扩散镀;从天然油漆涂层发展到各种有机和无机涂层。除了涂层、镀层防腐蚀技术外,还发展了电化学保护、缓蚀剂等极为重要的防腐蚀技术。随着其研究,开发和推广应用,已经形成了非常重要的防腐蚀技术这一科学领域。

经过长期的实践,人们总结了许多与金属腐蚀作斗争的经验,找到了许多成功的防腐蚀措施,它们行之有效,并日趋完善。当前,获得广泛应用的防腐蚀方法和控制金属腐蚀的措施,归纳起来有以下几种,如图 1-3 所示。

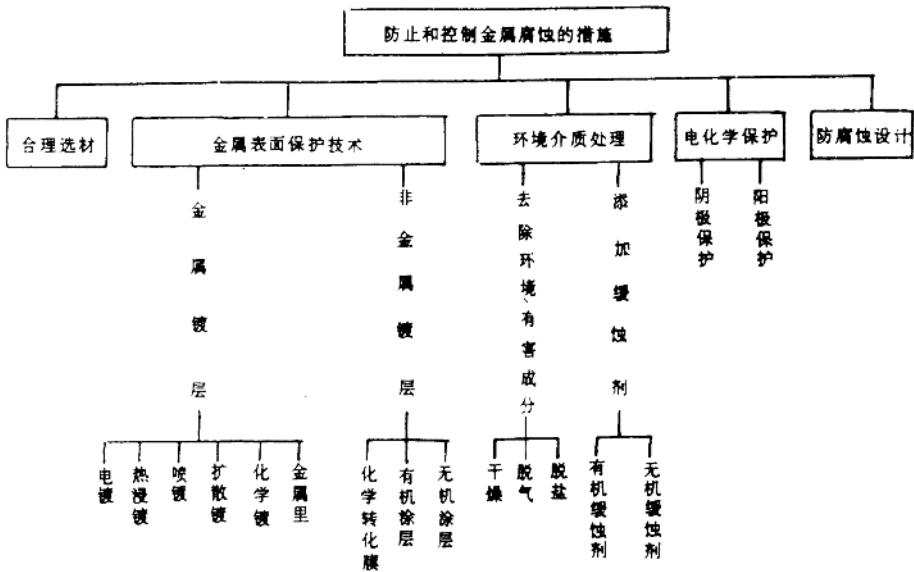


图 1-3 防止和控制金属腐蚀的措施

对我们从事船舶及海洋工程技术人员来说,并不需要掌握上述防腐蚀技术的全部,本教材只介绍与本专业直接相关的内容。

第四节 研究金属腐蚀与防护的重要意义

金属腐蚀问题遍及国民经济各个领域,从日常生活到工农业生产,凡是使用金属的地方都不同程度地存在着腐蚀问题。金属腐蚀给国民经济造成巨大的损失。据统计,每年由于腐蚀而报废的金属设备和材料相当于金属年产量的 1/3,其中的 2/3 可回炉重炼,那么余下的 1/3,相当于年产量的近 1/10 因腐蚀而损失,浪费了大量的有限资源和能源。其经济损失约占当年国民生产总值的 1.5—4.2% 左右。美国国会发表的统计数字,1975 年美国由于金属腐蚀造成的经济损失为 700 亿美元,为当年国民生产总值的 4.2%,而 1982 年竟高达 1260 亿美元。

不仅如此,金属腐蚀还会造成灾难性的事故,严重地威胁着人们的生命安全。由于金属腐蚀引起的灾难事故屡见不鲜,损失严重。1970 年日本大阪地下铁道的管道腐蚀折断,造成瓦斯爆炸,乘客当场死亡 75 人。1979 年我国某市液化石油气贮罐由于腐蚀爆炸起火,伤亡几十人,直接经济技术损失达 630 余万元。又如 1985 年 8 月 12 日日本一架波音 747 客机应力腐蚀断裂而坠毁,一次死亡 500 余人。

腐蚀造成的间接损失也是十分严重的。如发电厂锅炉的一根换热器管子蚀穿,管子只值几百元,但由于腐蚀可能引起爆炸,导致停电,进而使得一大片工厂停工,间接损失是巨大的。船舶因腐蚀而停航检修,其停航营运损失也是很大的。

由于金属腐蚀而造成化工、石油等各行各业的设备跑、冒、滴、漏可能使许多有害物质泄漏,这不仅造成直接经济损失,而且污染和危害自然生态环境,危害人的生命安全和身体健康。

因此,研究金属腐蚀与防护是有效地利用国家物质资源和能源,减少因腐蚀而造成的经济损失,防止环境污染,保证人民的生命安全和身体健康,都具有十分重要的意义。

第五节 海水腐蚀、海生物污损与船舶营运经济性

船舶及海洋工程结构物都处于海洋环境中,其水下部分除受海水强烈地电化学腐蚀外,还受海洋生物附着的污损。许多海洋生物和微生物能吸附于船底或其它金属结构表面,并生长和繁殖。特别是在温暖的海域和春夏两季,这些有害生物迅速生长繁殖,污损特别严重。这些海洋生物能破坏金属表面防腐蚀保护层(如漆膜脱落),加速了金属结构的局部腐蚀。而有些附着海生物本身就对金属有腐蚀作用,这些腐蚀同样降低了船舶和海洋工程结构的使用寿命。

众所周知,对营运中的船舶来说,随着营运时间的增加,船舶航速会逐渐降低。这是由于海水腐蚀、海生物侵蚀和附着而造成船体浸水表面粗糙度增加的结果。船体表面粗糙度增加引起船体摩擦阻力增加,在主机功率不变的情况下,降低了航速,欲保持原航速则燃料消耗增加。无论哪种情况,都大大降低了船舶营运经济性。

因此,防止海水腐蚀和海生物污损已成为防腐蚀科学的重要研究内容,具有重要的经济意义和实用价值。

下面具体讨论腐蚀和污损所造成的船体表面粗糙度增加这一直接结果,是如何影响船舶营运经济性及其影响的程度,使我们更进一步懂得海洋船舶防腐蚀和防污损的意义。

一、船体表面粗糙度

船体浸水部分表面粗糙度,一般由下列因素构成:船体壳板本身高低不平,表面粗糙;外板

接缝不平;涂料性能不好,涂层质量不高,旧涂层起泡或脱落;壳板锈蚀或机械损伤;海生物附着造成污损等。

粗糙度,一般采用英国造船研究会的定义。定义规定在船体壳板表面取长度为 50mm 范围内,测取粗糙表面最高峰和最低谷的距离。每艘船取 50—100 处,每处测 10 点,取其平均值定为平均粗糙度,单位为 $\mu\text{m}/50\text{mm}$ 。

D·Byrne 等人用新式电子仪器——船体粗糙度分析仪对 147 艘各种不同船龄的船舶进出坞时船体壳板表面粗糙度进行测量和分析,其结果如图 1-4 所示。

从图中可以看出:

1. 船舶建造中钢材预处理后的粗糙度为 $40\sim 75\mu\text{m}$,新造且完全涂装好的船舶壳板表面粗糙度为 $100\sim 150\mu\text{m}$,平均 $125\mu\text{m}$ 。

2. 船舶营运最初几年,船体粗糙度平均每年增加 $25\sim 30\mu\text{m}$ 。然而有些船舶只增加了 $6\mu\text{m}$,另一些船则高达 $75\mu\text{m}$ 。一般认为,选用高性能涂料时,船体粗糙度平均每年增长 $10\mu\text{m}$,选用中级涂料时,平均每年增长 $30\mu\text{m}$,选用普通涂料时,平均每年增加 $50\mu\text{m}$ 。

3. 对船龄较长的旧船,船体粗糙度的变化范围大,从 $500\sim 1000\mu\text{m}$ 。一般认为,如用普通涂料,船龄为 6—8 年的旧船,粗糙度约为 $500\mu\text{m}$,船龄在 12—14 年,粗糙度约为 $1000\mu\text{m}$ 。

毫无疑问,旧船经喷砂出白后可大大降低船体表面粗糙度。大量实测数据证明,船体喷砂处理后的粗糙度受原先采用何种涂料影响很大,各种船龄船舶喷砂出白前后实测表面粗糙度如表 1-1 所示。

表 1-1 各种不同船龄船舶出白前后表面粗糙度之比较 ($\mu\text{m}/50\text{mm}$)

船 龄	船体涂通常的油漆		船体涂中级油漆		船体涂高性能油漆	
	出白前	出白后	出白前	出白后	出白前	出白后
2—2 $\frac{1}{2}$	313	175	226	147	139	120
5—5 $\frac{1}{2}$	477	175	319	152	161	130
8	634	200	413	170	183	140
10	753	250	476	200	199	150
15	1028	500	632	335	236	170
每年平均增加	60		30		7.5	

应特别指出的是,当使用自抛光共聚物防污漆时,船体表面粗糙度不但不增加,反而随营运时间而逐年降低到一个较小的稳定值。

营运船舶采用电化学阴极保护,它的作用在于:减少船壳板腐蚀、延长漆膜寿命,降低船壳表面粗糙度,从而改善船舶营运经济性,同时可以大大减少再涂装前的表面处理工作。根据坦

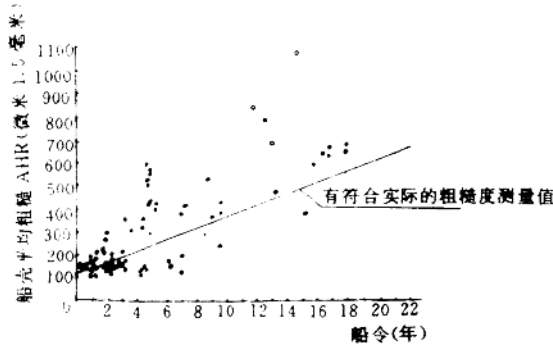


图 1-4 各种船龄船舶壳表面粗糙度测量值

费尔的研究, 32000t 油船, 未装阴极保护(外加电流)前, 船体表面粗糙度每年增加约 $125\mu\text{m}$, 而装阴极保护后, 降为每年增加 $25\mu\text{m}$ 。此结果相当于平均航速增加 0.5kn 。由于安装了阴极保护, 能在相当长的时间内维持原有的航速, 因此估计每年能节约燃料费的支出 25 万美元。

二、船体表面粗糙度对船舶航速和功率消耗的影响

新船船体表面粗糙度平均为 $125\mu\text{m}$, 但投入营运后 4—5 个月, 附着的海生物就急剧增加, 航速下降。英国船舶研究会对营运船舶船体表面粗糙度与摩擦阻力之间关系进行研究表明, 新船经过三年营运后, 由于船体粗糙度的增加使船的航速下降, 为了维持新船的航速, 轴功率须增加约 15%。

挪威船舶研究会根据实测和研究分析, 作出了船体表面粗糙度随时间变化和功率消耗量的关系曲线, 如图 1-5 所示。

图中垂线表示船体经喷砂处理并涂装新型涂料后表面粗糙度降低的情况。一艘具有良好阴极保护的船舶, 在船龄 8 年时经喷砂涂漆, 船体表面粗糙度降低到接近于新船的水平。而另一艘未加阴极保护, 船龄为 7 年的船舶船体经喷砂涂漆后仍有较高粗糙度。

根据图形, 粗糙度和功率消耗量之间可近似地按下列关系计算: 粗糙度从新船到 $230\mu\text{m}$ 之间的期间, 每增加 $10\mu\text{m}$, 功率就要增加 1%, 粗糙度在 $230\mu\text{m}$ 以上, 每增加 $10\mu\text{m}$, 功率就要增加 0.5%。

另根据 D·Byrne 的估算, 近似关系是:

(1) 当平均粗糙度不超过 $200\mu\text{m}$ 时, 船体表面粗糙度每增加 $10\mu\text{m}$, 消耗功率增加 1%。

(2) 当平均粗糙度在 $200-400\mu\text{m}$ 之间时, 船体表面粗糙度每增加 $14\mu\text{m}$, 消耗功率增加 1%。

(3) 当平均粗糙度在 $400-600\mu\text{m}$ 之间时, 船体表面粗糙度每增加 $20\mu\text{m}$, 消耗功率增加 1%。

1978 年国际船池会议 (ITTC) 采纳了 Bowden-Daviso 公式作为粗糙度与功率消耗量之间的关系来计算功率增额:

$$\frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{P} \times 100\% = 5.8[(K_1)^{\frac{1}{4}} - (K_2)^{\frac{1}{4}}]$$

式中: P ——主机发出的最大持续功率;

ΔP_1 ——粗糙度为状态 1 时主机功率消耗增量;

ΔP_2 ——粗糙度为状态 2 时主机功率消耗增量;

K_1 ——状态 1 时船体平均粗糙度;

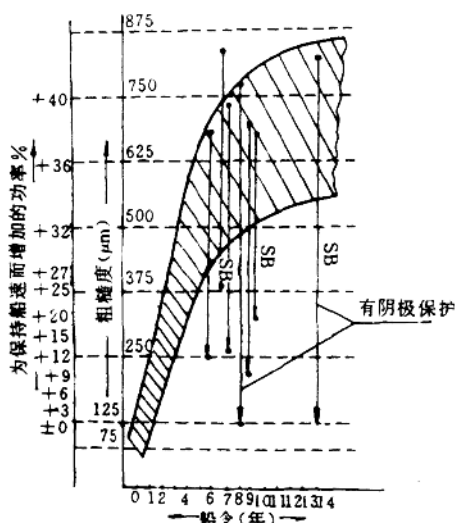


图 1-5 船体表面粗糙度随时间变化和燃料消耗量的关系

K_2 ——状态 2 时船体平均粗糙度。

根据表 1-1 提供的资料,按上述公式计算船体出白前后主机功率节约的百分比,以营运 5 年左右的船舶为例,出白前后达到相同航速,主功率可节约 13%。

三、降低船体粗糙度和功率消耗的措施

从以上讨论得知,降低船舶表面粗糙度,对减少燃料消耗,提高船舶营运经济性,具有非常重要的意义。通常采用以下主要措施,以降低营运船舶船体表面粗糙度。

1. 采用高质量的涂料和自抛光防污漆;
2. 采用涂料和阴极保护的联合防腐蚀技术;
3. 定期对船体表面进行喷砂除锈清理。

第二章 金属电化学腐蚀原理

第一节 电化学腐蚀原理

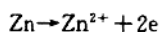
金属与环境介质发生电化学作用而引起的破坏过程称为电化学腐蚀。主要是金属在电解质溶液、天然水、海水、土壤、熔盐及潮湿的大气中引起的腐蚀。它的特点是在腐蚀过程中，金属上有腐蚀电流产生，而且腐蚀反应的阳极过程和阴极过程是分区进行的。

金属的电化学腐蚀基本上是原电池作用的结果。

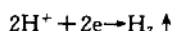
一、腐蚀原电池

将锌片和铜片浸入稀硫酸水溶液中，再用导线把它们连接起来组成原电池(图 2-1)。这时由于锌的电位较低，铜的电位较高，它们各自在电极/溶液界面上建立的电极过程平衡遭到破坏，并在两个电极上分别进行电极反应，这时就有电流产生。电子自负极通过外导线流向正极，即从锌片流向铜片，电流则从正极流向负极，即从铜片流向锌片。

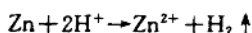
这时，在锌电极上，发生氧化反应，锌失去电子而溶解：



在铜电极上，发生还原反应，即氢离子还原成氢气析出：



整个电极反应为：



在电化学中规定，原电池中发生氧化反应的电极称为阳极(在介质中电流流出的电极，即图 2-1 中的锌片)，而发生还原反应的电极称为阴极(在介质中电流流入的电极，即图 2-1 中的铜片)。

上述铜锌电池作用的结果，锌溶解了，即锌在电解质溶液中受到了腐蚀。所以，电化学腐蚀是原电池作用的结果，这种原电池称为腐蚀原电池，或称腐蚀电池。

铜锌电池中锌电极，因为它是一种较活泼的金属，电位较负，容易失去电子而溶解成为正离子，就遭到腐蚀而铜的电位较正，不易失去电子，不溶解而不腐蚀。阳极锌与阴极金属电位差愈大，锌的腐蚀速度愈快。

如果我们将铜和锌直接接触，并一起浸入稀硫酸水溶液中，也将发生与上述原电池同样的反应，如图 2-2 所示。差别只是锌溶解后所提供的剩余电子不是通过外电路，而是流入与它直接接触的铜，并在铜表面为溶液中的氢离子所吸收，氢气在铜表面形成并逸出。只要溶液中有氢离子存在，阴极反应就会继续进行，锌就会继续溶解。

上述铜锌腐蚀电池铜电极和锌电极尺寸较大，肉眼可见，属于宏观腐蚀电池。但是，通常我们见到的，即使是一块金属，浸入腐蚀介质中，如一块工业用锌放入硫酸溶液中，也会发生溶

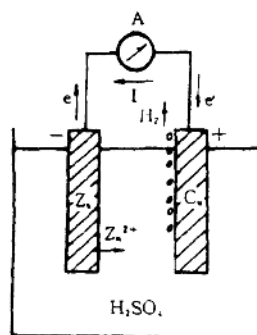


图 2-1 铜锌电池