

海水腐蚀手册

〔美〕M.舒马赫 编

李大超 杨 荫 等译

国防工业出版社

海水腐蚀手册

〔美〕 M.舒马赫 编

李大超 杨 荫 等译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是美国诺伊斯资料公司1979年出版的一本关于海水腐蚀问题的手册。

全书共分四章。第一章阐述控制海水腐蚀的各种因素及海洋环境中各种金属材料的腐蚀特性。第二章论述金属在不同海洋深度处的腐蚀并以图表形式列出了大量实验数据。第三章论述微生物对材料抗海水腐蚀性能的影响,讨论了包括细菌污损在内的各种环境中的试验。最后一章讨论非金属材料在海水中可能产生的材质下降现象,所涉及的非金属材料包括聚合物材料和复合材料、陶瓷、纸张、织物、照相材料和磁带、电子元件、火药和炸药等。

本书可供从事海水腐蚀研究和海洋工程的技术人员参考。

SEAWATER CORROSION HANDBOOK

M. Schumacher

noyes data corporation

Park Ridge, New Jersey, U. S. A.

1979

海水腐蚀手册

〔美〕M. 舒马赫 编

李大超 杨 荫 等译

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $1/32$ 印张 20 $1/4$ 536 千字

1985年4月第一版 1985年4月第一次印刷 印数: 0,001—1,900册

统一书号: 15034·2707 定价: 4.05元

译 者 的 话

随着海洋勘探的不断深入和海洋工程的飞速发展,人们越来越渴望更多地了解各种结构材料在海洋环境中的抗蚀性。

本书根据海洋试验场中得到的大量数据,评述了常用的金属材料在海洋环境中的腐蚀类型和抗蚀性,以及改善抗蚀性的途径。本书还论述了海生物对金属材料海水腐蚀的影响,以及聚合物材料、陶瓷、织物、纸张、磁带、电子元件等非金属在海洋环境中的行为。迄今为止,这是一本搜集海水腐蚀数据较全、涉及的材料较广的实用手册。

为了使海洋科学工作者和工程技术人员更多地了解材料海水腐蚀的知识和材料在海洋环境中的腐蚀数据,我们翻译了这本手册供他们正确选择和使用这些材料时参考。由于我们的水平所限,译得不妥之处请批评指正。

本书的前言由杨荫译,朱孝信校;绪言和第一章由吴始栋、李大超译,李大超、杨荫、朱孝信校;第二章由杨汝钧译,杨荫校;第三章由邓树滨译,李大超校;第四章由李玉楼、杨永生译,朱孝信、杨荫校。全书由杨荫、李大超审校。

前 言

这是一本对遇到海水腐蚀这一隐患的任何人都会有所裨益的实用手册。本书也是用从各种来源而又难以得到的资料中精心节录并加以整理的大量数据组成的评述。

本书引用的技术情报以美国海军研究实验室的一些研究小组及受政府各部门资助的其它一些研究小组的研究为依据。

本书第一章实际上是一篇综述。该章论述了关于金属在海洋环境中腐蚀的概况。素材取自美国金属和陶瓷情报中心 (MCIC) 报告 78-37 号《金属在海洋环境中的腐蚀》，W. K. 博伊德和 F. W. 芬克 (金属和陶瓷情报中心，俄亥俄州，哥伦布) 编著，1978年3月出版。

第二章论述金属在不同海洋深度处的腐蚀。素材来源于技术报告 R834 号《金属和合金在深海中的腐蚀》，F. M. 莱因哈特 (美国海军土木工程实验室，加利福尼亚州，怀尼米港) 编著，1976年2月出版。

第三章论述微生物的影响。该章由三篇报告精心编纂而成。第一篇原始报告是题为《生物污损及有机化合物和微生物对腐蚀过程的影响》的科学论文的预印本，S. M. 盖尔查科夫和 B. 萨曼 (迈阿密大学医学院微生物学系) 编著，1977年9月出版。第二篇报告题为《在大洋舌 4500 英尺深海处的腐蚀》，E. 费希尔和 S. 芬格 (美国海军应用科学实验室，纽约州，布鲁克林) 编著，1966年3月出版。第三篇原始报告题为《海生物对海水中结构钢使用寿命的影响》，C. R. 索思韦尔等 (美国海军研究实验室，华盛顿市) 编著，1974年3月出版。

第四章论述非金属材料浸在海水中或接触海水时可能产生的降质现象。该章以美国海军研究实验室报告 7447 号为依据。

本书目录的编排方式是使其能作为一种主题索引从而便于查找书中所包含的情报。为了引导研究人员进一步查找有关海水腐蚀这一疑难论题的文献，特在每章末附有大量的参考文献。全书共有 194 个表，127 幅图。

目 录

绪言	1
第一章 金属在海洋环境中的腐蚀	3
§ 1-1 绪言	3
§ 1-2 海洋环境	4
§ 1-2-1 海洋大气区	5
§ 1-2-2 飞溅区	6
§ 1-2-3 潮汐区	6
§ 1-2-4 全浸条件	7
§ 1-2-5 深海区	8
§ 1-2-6 泥浆区	10
§ 1-2-7 影响海水腐蚀性的因素	11
§ 1-2-8 腐蚀类型	15
§ 1-3 金属在海洋环境中的腐蚀	22
§ 1-3-1 碳钢	22
§ 1-3-2 低合金钢	40
§ 1-3-3 不锈钢	59
§ 1-3-4 镍及镍合金	80
§ 1-3-5 钴	98
§ 1-3-6 铜及铜合金	98
§ 1-3-7 钛及钛合金	121
§ 1-3-8 铝及铝合金	140
§ 1-3-9 铍	172
§ 1-3-10 镁	174
§ 1-3-11 特殊用途的金属	176
§ 1-3-12 阴极保护	186
§ 1-4 截止 1977 年的新资料	195
§ 1-4-1 海洋环境	195
§ 1-4-2 碳钢和低合金钢的腐蚀	197
§ 1-4-3 不锈钢的腐蚀	200
§ 1-4-4 镍基合金的腐蚀	205
§ 1-4-5 铜和铜合金的腐蚀	206
§ 1-4-6 钛和钛合金的腐蚀	208

§ 1-4-7 铝合金的腐蚀	209
§ 1-4-8 紧固件的腐蚀	215
§ 1-4-9 复合材料和其它材料的腐蚀	217
§ 1-4-10 有覆盖层的结构金属的腐蚀	218
§ 1-4-11 海水淡化装置用材料	221
§ 1-4-12 阴极保护	228
参考文献	229
附录 所选择的铜合金和铝合金的牌号和成分	260
第二章 金属和合金在不同海洋深度下的腐蚀	262
§ 2-1 绪言	262
§ 2-2 钢和铸铁	268
§ 2-2-1 钢铁	268
§ 2-2-2 锚链	309
§ 2-2-3 铸铁	310
§ 2-3 铜合金	312
§ 2-3-1 铜和铍-铜	313
§ 2-3-2 黄铜 (Cu-Zn 合金)	314
§ 2-3-3 青铜	316
§ 2-3-4 铜-镍合金	318
§ 2-3-5 全部铜合金	319
§ 2-4 镍和镍合金	356
§ 2-4-1 镍	356
§ 2-4-2 镍-铜合金	353
§ 2-4-3 其它镍合金	360
§ 2-4-4 应力腐蚀	364
§ 2-5 不锈钢	402
§ 2-5-1 AISI200 系不锈钢	404
§ 2-5-2 AISI300 系不锈钢	405
§ 2-5-3 AISI400 系不锈钢	407
§ 2-5-4 沉淀硬化不锈钢	409
§ 2-5-5 其它各种不锈钢	412
§ 2-6 铝合金	461
§ 2-6-1 1000系铝合金 (至少含99.00%铝)	462
§ 2-6-2 2000系铝合金 (Al-Cu 合金)	463
§ 2-6-3 3000系铝合金 (Al-Mn 合金)	465
§ 2-6-4 5000系铝合金 (Al-Mg 合金)	466
§ 2-6-5 6000系铝合金 (Al-Mg-Si 合金)	468

§ 2-6-6 7000系铝合金(Al-Zn-Mg合金)	469
§ 2-7 钛合金	502
§ 2-7-1 腐蚀	502
§ 2-7-2 应力腐蚀	504
§ 2-7-3 机械性能	519
§ 2-8 其它各种合金	520
§ 2-8-1 暴露持续时间	520
§ 2-8-2 海水深度的影响	523
§ 2-8-3 氧浓度的影响	523
§ 2-8-4 机械性能	524
§ 2-9 金属丝绳	530
参考文献	546
第三章 海生物的影响	547
§ 3-1 金属腐蚀中的生物因素	547
§ 3-2 生物污损	548
§ 3-3 微生物腐蚀	549
§ 3-3-1 腐蚀机理	551
§ 3-4 试验工作	555
§ 3-5 结论	559
§ 3-6 建议	559
§ 3-7 估算钢在海水中的使用寿命	560
§ 3-8 长期暴露数据的分析	561
§ 3-8-1 四种含水环境的比较	561
§ 3-8-2 在淡水中的氧扩散控制	562
§ 3-8-3 海洋环境中的生物控制	563
§ 3-9 五个海洋试验场的腐蚀研究	567
§ 3-9-1 海洋污损的保护作用	569
§ 3-9-2 硫酸盐还原菌的分布和影响	572
§ 3-10 不同地理位置处受生物控制的腐蚀速度	573
§ 3-11 长期暴露中金属损失的估算	575
§ 3-12 总结	576
参考文献	577
第四章 非金属材料的行为	581
§ 4-1 背景与绪言	581

§ 4-2 聚合物材料和复合材料	582
§ 4-2-1 聚合物材料	582
§ 4-2-2 复合材料	592
§ 4-2-3 总结和结论	595
参考文献	596
§ 4-3 陶瓷制品、纸张、织物、照相材料和磁带	598
§ 4-3-1 绪言	598
§ 4-3-2 陶瓷制品	599
§ 4-3-3 纸张和印刷文件	600
§ 4-3-4 织物(纺织品)和纤维	602
§ 4-3-5 照相材料	604
§ 4-3-6 磁带	607
参考文献	608
§ 4-4 电子元件	609
§ 4-4-1 绪言	609
§ 4-4-2 损坏的类型和程度	609
§ 4-4-3 浸过海水后的设备的处理	613
§ 4-4-4 总结和结论	613
参考文献和参考书目	614
§ 4-5 火药和炸药	617
§ 4-5-1 绪言	617
§ 4-5-2 火药的基本性能和组分	617
§ 4-5-3 炸药和点火元件、延期药和曳光剂	629
§ 4-5-4 组装的弹药制品	633
§ 4-5-5 结论	637
本书所引用的资料来源	638

绪 言

只要人类对海洋及其所蕴藏的矿物、代用食品和其它海洋产物的勘探继续下去，就必须相应地研究能经受住海洋环境有害影响的材料。对海洋结构用金属和非金属的适用性不能置之不顾。当人类日益致力于近海钻探、海洋采矿、萃取冶金学和近海气象学方面的研究时，必须研制应用于这些新技术的尽可能好的材料。

欲研制这些材料，十分重要的是要掌握它们在各种海洋环境中将会具有的行为。在试图获取这方面的知识的过程中，各工业组织、政府机构和教育部门均对这些结构材料做了全面的试验，以观察它们在海洋环境中长期暴露时的行为。论述材料在海洋环境中的腐蚀问题的这本书，提供了包罗这些机构所搜集到的资料在内的许多报告。

许多材料都会腐蚀，在应力作用下腐蚀更甚。“腐蚀”的含义就是材料逐渐溶解掉或磨损掉，特别是受到化学作用时。广义地说，腐蚀只不过意味着材料受损伤、损耗和降质。正是从这种广义的材质下降出发，本书将不仅考虑金属而且还将考虑非金属在海洋环境中的行为。例如，本书的最后一章将要讨论海水对诸如聚合物、陶瓷、织物、电子元件和炸药等材料的作用。为了确定这些材料在海洋环境中应用的有效性，必须评定它们对海生物腐蚀和化学侵蚀的敏感性。

所谓“海洋环境”，是指处于从雾气弥漫的海洋大气到海底泥浆这一范围内的任一种海洋工程材料周围的任一种物理状态。诸如温度、风速、太阳照射和水中氧含量等可变因素必须予以考虑。例如，氧含量高会引起腐蚀。在大西洋中，各种深度的海水中氧含量都是相当高的，预计其腐蚀性要超过太平洋。在太平洋中，深度约为 2000 英尺处的氧含量最低（当然，假定其它可变

因素均相同)。

细菌在腐蚀中也起作用。诸如海底沉积物和海泥中发现的硫酸盐还原菌会产生对钢和铜之类的金属有腐蚀作用的硫化物。另一方面,生物污损也会起防蚀作用。钢的表面完全覆盖海生物时,污损物会因阻止腐蚀所必需的氧到达金属表面而减轻腐蚀。然而,含有某些代谢产物(如由海藻上细菌的作用而形成的甘露糖醇)的海洋环境会加速某些金属的腐蚀。

本书的第一章是一篇阐述控制腐蚀的各种因素的综合性报告。文中还从这一角度出发逐一论述了应用于海洋设施的各种金属材料的腐蚀。为进行综述,文中提供了有关金属及其合金的腐蚀性能的大量数据。

第二章的主题是海洋深度和不同试验场中的暴露对美国海军土木工程实验室在三个月左右到三年的时间内暴露的475种合金的20000个试样腐蚀速度的影响。文中以图表形式列出了大量数据。

第三章论述深海中微生物在材料因接触海水而降质方面所起的作用。讨论了包括细菌污损在内的各种环境中的试验。适合于微生物生长的碳素结构钢在海水中的长期和短期暴露显示了这些作用。这些试验结果还指出,应当进一步研究通过选择性地抑制使腐蚀加速的细菌来阻止腐蚀的可能性。

如前所述,最后一章探讨了塑料、织物和磁带之类的非金属材料浸泡在海水中时是否会降质。

总之,除腐蚀性外的诸因素,如某种特定材料的成本、效能和耐用寿命等也会影响到设计工程师对选择该材料用于海洋设备所作出的决定。本书提供的数据可对设计师在这方面作出明智的选择有所助益。

第一章 金属在海洋环境中的腐蚀

§ 1-1 绪 言

东

目前, 海洋深处的科学勘探和开发正在加速进行。一些海洋领域的活动普遍受到国家重视。现在关心的有代表性的领域大致可分为以下几类: 近海采矿 (石油、天然气、硫磺、盐、金刚石和煤); 食品生产 (鱼、贝类、植物等); 海水提取 (镁、溴、盐和淡水) 及近海气象 (控制风暴)。

在发展用于深海研究和水下作业的设备方面进展尤其迅速。已经用特种深潜器完成了一种深潜新技术的研究, 这种深潜器有的还装有供救援、回收和勘探用的工作臂。多种新型水面船舶, 如气垫船、水翼船、核动力和喷气发动机动力船、种类繁多的工作艇和调查研究船也在迅速发展。此外, 石油和天然气工业部门还建成了大量近海平台、管线、水下仓库和海岸设施。当前仅在墨西哥海湾海域就有 14000 多个近海钢结构, 而且数量还在增加。

所有这些日益增多的活动, 使设计师们肩负着设计专为适应恶劣海洋环境的新颖装备和设施的重任。在选择近海结构、船舶、深潜器、海底装置和仪器包装用的结构材料之前, 必须考虑许多因素, 如材料的生产成本、它们在预定的设计中的效能以及在受腐蚀过程中的腐蚀作用和应力与腐蚀相互作用的影响时预计的寿命等。在大多数海洋设施系统中, 为维护设施或设备正常运转所需的费用是一笔巨款。

许多材料制成设备后在海水中使用时会遭到意外的损坏。这种情况与材料在实验室盐溶液中试验时确定的预期行为不同。海水与材料的化学反应是复杂的。有机物和海生物的存在也会使材料损坏的方式趋于更加复杂。

国防金属情报中心收到了要求对在海洋环境中使用的设备或设施的选材给予帮助的大批信件,本报告就是应这些要求而写的。文中首先讨论影响材料在海水和海洋大气中的腐蚀行为的各种因素,随后评述各种材料的抗蚀性。

本章是根据对所选择的一些文献资料的评述、同海洋领域的技术人员的讨论以及来自巴特尔实验室关于海洋腐蚀领域的一些研究计划的资料编写成的。这些主要论述材料在实际海洋环境中而不是在实验室模拟条件下的腐蚀试验结果和性能降低行为的报告提供了最可靠的资料。

§ 1-2 海 洋 环 境

海洋占地球表面面积的70%以上,也是最丰富的天然电解质。大多数常用的结构金属和合金受海水或雾气弥漫的海洋大气侵蚀。既然材料的行为会随暴露条件的不同而发生很大的变化,通常就按所涉及的具体环境区域来讨论其性能。这些区域是:海洋大气区、飞溅区、潮汐区、浅海区、深海区以及泥浆区。典型海洋环境的分类示于表1-1。

表1-1 典型海洋环境的分类

海 洋 区 域	环 境 条 件	钢 的 腐 蚀 行 为
海洋大气区 (飞溅区以上)	由风带来的细小海盐颗粒。影响腐蚀性的因素是距离海面的高度、风速、风向、降雨周期、雨量、温度、太阳照射、尘埃、季节和污染。甚至鸟粪也是一个因素。	阴面可能比阳面损坏得更快。雨水能把顶面的盐冲掉。珊瑚粉尘与盐一起似乎对钢制设备有特殊的腐蚀性,通常随着深入内陆,腐蚀迅速减弱。
飞溅区	潮湿、充分充气的表面,无海生物污损。	许多像钢这样的金属在此区的侵蚀最严重。保护涂层比在其它区域更难保持。
潮汐区	高潮线处常有海生物污损。可能存在来自污染的港口水的油层。通常有充足的氧气。	在整体钢桩的情况下,位于潮汐区的钢可充当阴极(充分充气),并可因恰处于潮汐区以下的钢的腐蚀而得到一定程度的保护。在潮汐区,单独的钢样板有较严重的侵蚀。表面的油层能减轻钢的侵蚀。

(续)

海洋区域	环境条件	钢的腐蚀行为
浅海区 (近表层和近海岸)	海水通常为氧所饱和。污染、沉积物、海生物污损、海水流速等都可能起重要作用。	腐蚀可能比海洋大气中更迅速。在阴极区形成钙质水垢。可采用保护层和 (或) 阴极保护来控制腐蚀。在大多数浅海中, 有一层硬壳及其它生物污损阻止氧进入表面, 从而减轻了腐蚀 (务必考虑由污损的重量而引起的构件应力增加)。
大陆架区	无植物污损、随着离海岸距离的增加, 动物 (贝壳) 污损也大大减少。氧含量有所降低, 特别是在太平洋中, 温度亦较低。	
深海区	氧含量可变化。在太平洋中, 深海区的氧含量往往比表层的低得多, 而在大西洋中, 二者差别不大。温度接近于 0℃。海水的流速低。pH 值比表层的低。	钢的腐蚀较轻。极化同样面积的钢, 所耗阳极较表层处多。不易生成保护性矿物质水垢。
泥浆区	往往存在细菌, 如硫酸盐还原菌。海底沉积物的来源、特征和性状不同。	泥浆通常是腐蚀性的, 很少是惰性的。有可能形成泥浆—海底水腐蚀电池。部份埋设的钢桩板在泥浆中有快速腐蚀之趋势。硫化物是一个因素。结构埋设部份阴极极化所耗电流比海水中少。

§ 1-2-1 海洋大气区

在海洋大气区, 聚集在金属表面的盐粒或盐雾的数量大大影响侵蚀的剧烈程度。盐的沉积随风浪条件、距离海面的高度及暴露时间等因素而变化。由于海盐 (特别是氯化钙和氯化镁) 是吸湿性的, 故易在金属表面形成液膜。在昼夜或季节气候变化时达到露点处尤为明显。除了有强烈风暴时, 内陆大气的含盐量通常急剧下降, 在深入内陆约一英里处, 大气中的含盐量降低到几乎测不出来的程度。然而, 在某些内陆地区可发现大气中含有可测出的盐量。

太阳照射是影响腐蚀行为的另一个因素。这种照射会促进铜或铁之类的金属表面的光敏腐蚀反应及真菌之类的生物活性, 这

样就助长了捕集腐蚀性水珠和尘埃。在热带地区，珊瑚粉尘和海盐在一起时环境的腐蚀性特别强。

降雨量和一定时期内的雨量分布也影响金属在海洋大气中的腐蚀速度。频繁的降雨会因冲刷掉金属表面沉积的盐份而使侵蚀有减轻之趋势。阴面的腐蚀有时会比阳面更严重，这是因为尘埃和空气带来的海盐污染物未被冲掉之缘故。

真菌和霉菌会在金属表面沉积，并主要因保持表面的水分而增强环境的腐蚀性。

就海洋环境的腐蚀性而言，一般热带最强，温带次之，北极最弱。当然，单是温度尚不能完全说明所观察到的差异，因为与腐蚀有关的其它因素也因地理位置而异。

§ 1-2-2 飞 溅 区

在飞溅区，材料几乎连续不断地为充分充气的海水所润湿。在这个区域内不会发生生物污损。风和海水同时作用造成严重海情处，海水的冲击会加剧材料在飞溅区的破坏。

对于很多材料，特别是钢，飞溅区是所有海洋区域中腐蚀性最强的区域。进入海水中的气泡还会使海水在去除保护膜或涂层方面变得更有破坏性。漆膜通常在飞溅区比在其它区域老化得更快。

在飞溅区，象不锈钢和钛这样一些金属往往是抗蚀的，这是由于充分充气的条件促进了金属钝化之缘故。

§ 1-2-3 潮 汐 区

同飞溅区一样，潮汐区的金属表面亦与充分充气的海水接触，至少每天有一段时间是如此。金属表面的温度既受气温也受水温的影响，但通常接近或等于海洋的温度。潮汐因地区而异。对于钢之类的材料，较大的潮流运动会使侵蚀速度增大。海生物会栖居在潮汐区内的金属表面上。在某些情况下，海生物的这种栖居也许能使钢这样的金属表面得到部分的保护，或者会使不锈钢

之类的金属局部侵蚀加快。

人们必须将潮汐区中孤立的试验样板的行为和实践中发生的典型事例区别开来。在实践中，象一根钢桩这样的结构是从大气区经飞溅区和潮汐区延伸至全浸区和泥浆区的。就一根整体的钢桩而言，恰好位于水线下的那部分表面侵蚀得很快，而水线部分的表面成了阴极，并因水线下面的金属腐蚀而得到保护。因为这个区域是不断变动的，并有充足的氧供给，所以不会象全浸的表面那样可能产生阴极极化。

孤立的试验样板在潮汐区内的腐蚀速度很可能比上述条件下得到的腐蚀速度高，因为它每天总有一段时间得不到阴极保护。

§ 1-2-4 全 浸 条 件

金属在海水中的腐蚀行为可按其腐蚀速度受控制的情况分成两大类：（1）主要受阴极反应控制；（2）受紧密附着的氧化物钝化膜控制，钢是海水腐蚀速度受阴极控制的这类金属最好的例子。锌和镁也属于这种类型。钛或合金化程度较高的镍-铬-钼合金（如 Hastelloy C）是钝性金属的典型例子。在某些海水环境中奥氏体不锈钢也呈钝性。

铂、金和银等贵金属的腐蚀行为不能归因于形成钝化膜。他们固有的抗蚀性是因为本身的热力学特性即惰性之缘故。

本章之所以多处讨论普通碳钢的行为是因为：（1）碳钢是海洋设施中应用得最广泛的结构材料；（2）对影响碳钢腐蚀行为的各种因素已进行过详细的研究。碳钢的侵蚀速度主要受阴极上氧的可获量控制。下面讨论氧的供给和与钢的腐蚀有关的其它因素。

在浅海区，氧的供给通常呈饱和或接近饱和的状态；生物活性（包括植物和动物）也最大。表层水的温度比中等深度的海水或深海区的水温高得多，而且因地理位置而异。

生物污损，特别是硬壳类生物的污损会减轻钢的侵蚀，这是由于（1）降低了含氧海水的流速；（2）在阴极区起阻碍氧扩