

海水冷却系统的 腐蚀及其控制

王曰义 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

78306

海水冷却系统的 腐蚀及其控制

王曰义 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

海水冷却系统的腐蚀及其控制/王曰义编著. —北京:
化学工业出版社, 2006.2
ISBN 7-5025-8281-9

I. 海… II. 王… III. ①海水-冷却系统-腐蚀②海水-冷却系统-防腐 IV. TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 011857 号

海水冷却系统的腐蚀及其控制

王曰义 编著

责任编辑: 陈志良

文字编辑: 林 媛

责任校对: 李 林

封面设计: 于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市兴顺印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 彩插 4 字数 337 千字

2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8281-9

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

水冷却系统在许多工业领域生产流程中必不可少的重要组成部分，如船舶、电力、炼油、化工等工业领域中的许多设备或装置都需要设置水冷却系统，用来防止因温度升高而导致的工作能力丧失或工作效率降低。

在水冷却系统中，由于作为冷却介质的水源千差万别，经常不得不采用侵蚀性很强的水作为冷却介质，加之作为冷却介质的水通常都是在流动工况下工作的，因此，因腐蚀问题而导致水冷却系统的失效，从而造成船舶停航、电厂和化工厂停产的事故经常发生。

我国大部分地区特别是沿海城市及西部地区，淡水资源十分短缺，严重制约着区域经济的发展，利用海水、苦咸水和中水替代淡水是缓解我国淡水资源短缺的一个重要途径。沿海地区是我国人口最多、经济最发达的地区，是我国对外开放的前沿和窗口，经济的持续发展性和人民生活水平的提高，对水的需求越来越大。而水资源的严重污染，使本来就紧张的水资源的供需矛盾更加尖锐化。面对水资源的短缺，向占地球水总储量 96.5% 的海洋要水势在必行。

工业冷却水是用水大户，约占工业用水量的 90% 以上。因此，用海水代替淡水作为用水大户的工业冷却水是解决沿海地区淡水资源紧缺的重要措施。推广海水用作冷却水必须首先解决海水对结构材料的腐蚀问题。因此加强海水冷却系统的腐蚀及其控制研究势在必行，迫在眉睫。海水冷却系统中的腐蚀与海水腐蚀还有很大的差别，在海水冷却系统中，海水处于流动状态，金属在流动海水中既遭受海水的腐蚀作用又遭受流体的冲刷、冲撞等机械作用，流动海水对金属的腐蚀破坏作用比静止海水要苛刻得多。因此，虽然在海水冷却系统中通常都采用比较耐蚀的金属材料，但腐蚀破坏事故仍然屡见不鲜。仍然有许多腐蚀问题急需研究，有许多新的腐蚀控制技术和腐蚀防护技术有待推广和开发。所有这些都待腐蚀科学工作者和有关企业的工程技术人员不断进取，与时俱进，在解决水冷却系统中的腐蚀问题方面取得更多、更大的进展。

可惜的是，直至目前我国还没有一部专门论述海水冷却系统腐蚀及其控制方面的书籍，大量的腐蚀破损问题仍然停留在头痛医头、脚痛医脚的状况。因此，本书的出版，实乃诸多工业领域工程技术人员所急需。我相信一定会受到有关工业领域工程技术人员欢迎。

本书作者王曰义同志 1963 年毕业于武汉水运工程学院港口机械专业，至今 40 多年一直从事船舶和海洋腐蚀研究工作，多次主持和参与船舶结构重大腐蚀破损分析和调查研究工作。1983 年曾翻译出版了《海船的腐蚀与保护》一书，并参与编写了《船舶工程辞典》和《船舶材料手册》两本著作，在国内外学术刊物上发表论文 40 余篇。特别是 1978 年以后，工作重点转移到船舶水冷却系统腐蚀行为研究，系统地研究了水冷却系统常用结构材料在流动海水中的腐蚀行为，积累了大量的有关腐蚀数据、照片和规律方面的资料，并涉足海滨电厂水冷却系统的腐蚀问题研究和保护。

本书是我国第一部论述水冷却系统腐蚀及其控制方面的专著，具有较高的学术水平和应用价值，她的问世必将对我国海水冷却系统腐蚀问题的解决起到积极的借鉴作用，促使我国海水冷却系统的安全运行提到一个新的高度。

山东省腐蚀与防护学会理事长
中国工程院院士

侯保荣

2005年12月

前 言

作者从事海洋和船舶腐蚀研究 40 多年，后半生主要从事海水冷却系统的腐蚀破损分析、腐蚀状况调查和流动海水腐蚀试验研究，也进行了一些腐蚀控制和腐蚀防护方面的工作，积累了大量的有关这方面的资料和数据，弃之可惜。因此，非常希望将这些资料和数据整理出来，公之于世，以利国家，以利后人。撰写此书的目的就是要总结海水冷却系统的腐蚀问题及其控制方法，从而为我国的腐蚀科学与防护技术做出一点微薄的贡献。本书的主要特点是：内容大量取材于作者本人的工作，以及与作者长期合作的课题组全体工作人员的工作。内容侧重于有关工业领域工程技术人员的实际应用性；书中收入了大量由作者所承担项目的图表，其中大部分是首次公布于众的，包括各种金属及金属结构在流动水中的腐蚀破损形貌照片，图文并茂。书中的腐蚀调查和腐蚀事故案例分析主要取材于作者比较熟悉的海船和海滨电厂，也可供其他工业领域水冷却系统解决腐蚀问题时参考。

在本书的编写过程中，得到了中国船舶重工集团第 725 研究所海洋腐蚀与防护国防科技重点实验室的大力支持和赞助。需要特别指出的是，本书的完成与承担大量腐蚀试验测试工作的刘玉梅女士密不可分，也特别感谢姚萍高级工程师和王洪仁高级工程师对于本书的完成所做过的技术工作。郭为民高级工程师为本书的插图、照片进行了整理工作，在此一并表示衷心的感谢！

本书可供船舶、电力、石化、石油等工业领域中的设计人员和工程技术人员在解决水冷却系统中的腐蚀问题时参考，也可用作大专院校本科生及研究生的参考书。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。




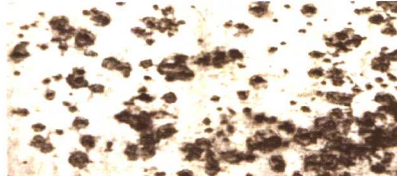

作 者
2005 年 12 月

内 容 提 要

本书系统论述了海水冷却系统的腐蚀类型、机理及腐蚀控制方法和防护方法。内容主要包括海水冷却系统的腐蚀环境和腐蚀特点分析，海水冷却系统的腐蚀事故案例介绍，流动海水中金属腐蚀机理和影响因素分析，各种结构材料在流动海水中的腐蚀行为，海水冷却系统的腐蚀试验方法，以及海水冷却系统中结构材料的腐蚀控制方法和腐蚀防护方法。

本书可供船舶、电力、石化、石油等工业领域中的设计人员和工程技术人员参考，也可用作相关专业学生的参考书。

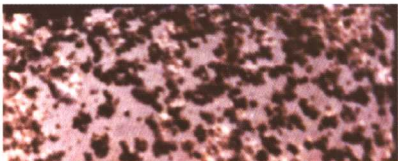
金属的典型腐蚀形貌

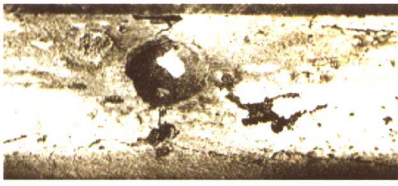
类别	照片	简要说明
全面腐蚀:发生在整个金属表面上的一种腐蚀形貌,又称一般腐蚀或普遍腐蚀		
全面均匀腐蚀		<p>这种腐蚀主要可能出现在两种情况下:一是金属表面具有非常优良的保护膜;二是金属在酸性水溶液中的溶解。在实际工程结构中这种腐蚀没有实际意义</p>
全面不均匀腐蚀		<p>这是工程结构中最常见到的一种腐蚀形貌,是一般腐蚀的代表性腐蚀形貌。多发生于不能生成钝化膜,生成的腐蚀产物膜疏松、不具有保护性的金属结构材料上</p>
局部腐蚀:在金属表面的局部区域发生的腐蚀。可细分为下述六种腐蚀形貌		
孔蚀		<p>小而深的局部腐蚀,多发生于因具有钝化膜才具有优良耐蚀性的金属结构材料上,如铝合金、不锈钢</p>
点蚀		<p>小而不明深度的局部腐蚀,多发生于能生成钝化膜或腐蚀产物膜,但膜又容易遭到破坏的金属结构材料上,如铝合金、铜镍合金等</p>
斑状腐蚀		<p>大而浅的局部腐蚀,可能是全面不均匀腐蚀的初期阶段。只要时间足够长,就可能扩展为全面不均匀腐蚀形貌</p>

续表

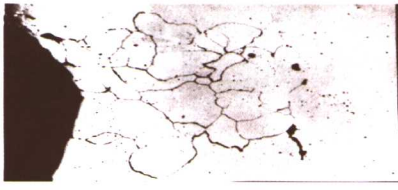
类别	照片	简要说明
溃瘍腐蚀		<p>大小与深度相当的局部腐蚀,又名坑状腐蚀或腐蚀坑,通常指大小和深度都明显可见的局部腐蚀。它常常可能是全面不均匀腐蚀的局部深坑</p>

局部腐蚀:在金属表面的局部区域发生的腐蚀。可细分为下述六种腐蚀形貌

麻点腐蚀		<p>成群结队难以数得清个数的点蚀。与点蚀一样,多发生于能生成钝化膜或腐蚀产物膜,但膜又容易遭到破坏的金属结构材料上,如铝合金、铜镍合金等</p>
------	---	---

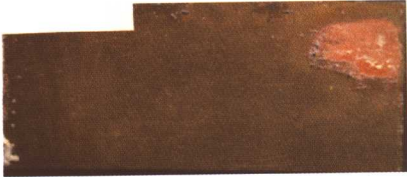
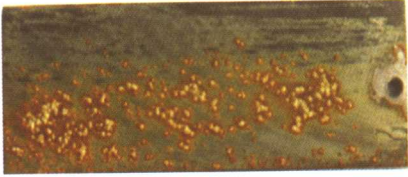
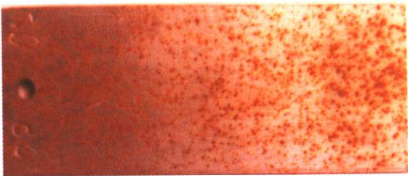
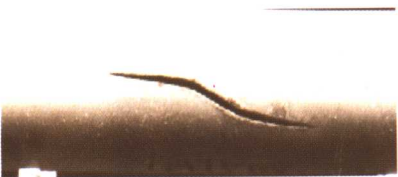
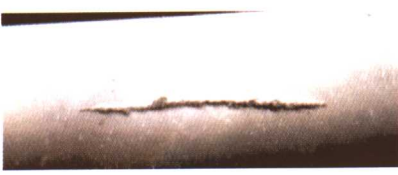
腐蚀穿孔		<p>孔蚀或溃瘍腐蚀发展至极致的一种腐蚀形貌</p>
------	--	----------------------------



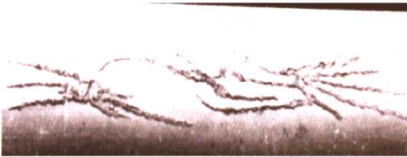
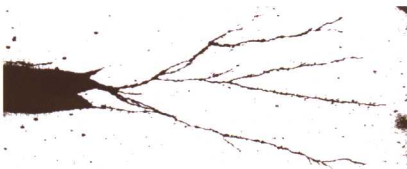

晶间腐蚀:金属体内的晶粒难于腐蚀,腐蚀沿晶粒边界进行时,叫做晶间腐蚀

晶间腐蚀		<p>晶间腐蚀导致晶粒周围变质,晶粒间的相互结合力丧失,使金属变脆。严格地说,它也是一种局部腐蚀,因其有沿晶粒边界向金属内部进行的特点,所以单列一类</p>
------	---	--

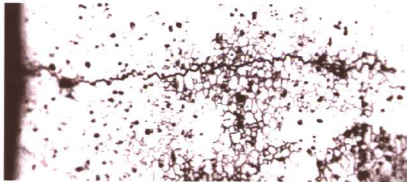
脱成分腐蚀:其特点是合金中的某一种或几种成分优先腐蚀,使腐蚀区变成海绵状,引起合金强度显著降低,又名成分选择性腐蚀。合金成分之间电位相差较大的金属容易出现脱成分腐蚀敏感性,如黄铜的脱锌、铝青铜的脱铝等

全面层状脱成分腐蚀		<p>在整个金属表面上到处都发生的脱成分腐蚀</p>
-----------	---	----------------------------

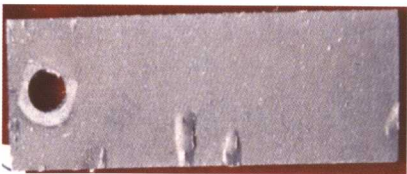
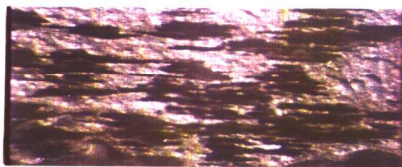
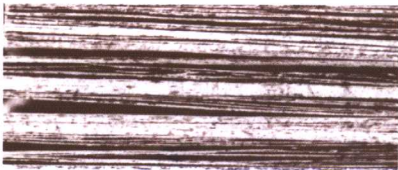
类别	照片	简要说明
局部层状脱成分腐蚀		<p>在金属表面的局部区域上发生的层状脱成分腐蚀</p>
塞状脱成分腐蚀		<p>在局部区域从金属表面向金属内部进行的脱成分腐蚀。在金属表面上通常可看到点状的被溶解元素的腐蚀产物堆积</p>
弥散塞状脱成分腐蚀		<p>成群结队难以数得清个数的塞状脱成分腐蚀,这与麻点腐蚀除腐蚀产物之前的外观十分相似</p>
<p>应力腐蚀开裂:是在金属表面和断面上都表现为裂纹形貌的一种腐蚀,并且都可有直线状和树枝状两种主要腐蚀形貌,它是机械应力与电化学腐蚀的联合作用结果</p>		
直线状应力腐蚀开裂		<p>张开型应力腐蚀开裂</p>
未裂开的直线状应力腐蚀开裂		<p>裂纹上有一条线状腐蚀产物堆积</p>

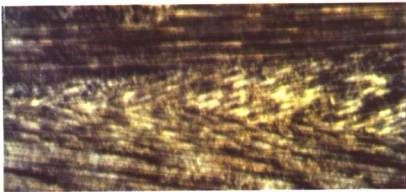
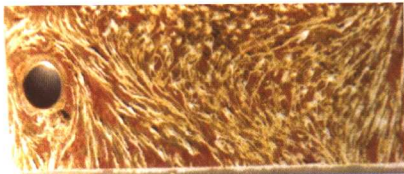
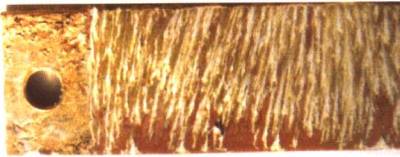
类别	照片	简要说明
树枝状应力腐蚀开裂		张开型应力腐蚀开裂
未裂开的树枝状应力腐蚀开裂		除腐蚀产物后的腐蚀形貌
未裂开的树枝状应力腐蚀开裂		裂纹上有一团树枝状腐蚀产物堆积
断面的树枝状应力腐蚀开裂		未经金相侵蚀的显微照片
穿晶应力腐蚀开裂		裂纹穿过晶粒向前传播的应力腐蚀开裂，经金相侵蚀的显微照片

续表



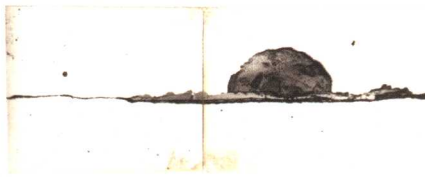

类别	照片	简要说明
晶间应力 腐蚀开裂		<p>裂纹沿着晶粒边界向前传播的应力腐蚀开裂</p>

剥落腐蚀:主要出现在具有晶间腐蚀敏感性的金属材料中,从表面上看是肿胀或鼓包,从侧面上看为分层状腐蚀。高强铝合金最容易产生这种腐蚀形貌

局部肿胀		<p>剥落腐蚀的表面腐蚀形貌,其特点是局部表面出现肿胀或鼓包</p>
层状腐蚀 1		<p>前样迎水侧边的低倍照片,可见侧边层状腐蚀形貌</p>
层状腐蚀 2		<p>Al-9%Mg 铝合金五块板状试样叠放在一起拍摄的侧边腐蚀形貌</p>

类别	照片	简要说明
<p>侵蚀腐蚀:又称磨蚀腐蚀。是金属在流体的力学作用和腐蚀作用联合作用下发生的腐蚀类型。工程结构中常见的侵蚀腐蚀类型主要有两种腐蚀形貌:冲击腐蚀和空泡破损</p>		
<p>冲击腐蚀:冲击腐蚀的典型腐蚀形貌是马蹄形坑。根据大量流动海水腐蚀试验结果表明,冲击腐蚀的典型腐蚀形貌不止马蹄形蚀坑一种,至少可有如下六种</p>		
晶粒显出		<p>腐蚀试验后的试样不需任何制备即可在低倍放大情况下显示出晶粒组织。也可以说这是一种组织选择性腐蚀</p>
紊流状态 流线形腐蚀 形貌		<p>腐蚀试验后的试样表面清晰地显示出紊流状态的流线形</p>
层流状态 流线形腐蚀 形貌		<p>腐蚀试验后的试样表面清晰地显示出层流状态的流线形</p>
马蹄形 蚀坑		<p>这是冲击腐蚀的典型腐蚀形貌,很像马在泥路上奔跑所留下来的马蹄印。众多马蹄形坑成群出现时,又可称做鱼鳞坑状腐蚀形貌</p>

类别	照片	简要说明
迎水侧边耗损		<p>强度低和耐蚀性差的金属材料在流速较高或含砂的流动海水中,可能发生迎水侧边严重耗损现象</p>
壁厚减薄		<p>在紊流严重部位,可见局部壁厚均匀减薄现象,如海水管路的进口端部或拐弯部位。冲刷腐蚀试验时也可见到试样迎水侧边局部减薄现象</p>
腐蚀穿孔		<p>马蹄形坑发展到极致的一种腐蚀形貌</p>
空泡破损		<p>空泡破损的简单定义是:固体材料表面由于连续地暴露到空泡作用下而发生的渐增损失,属于以侵蚀为主的一种腐蚀侵蚀现象</p>

类别	照片	简要说明
蒸汽冲蚀		<p>这也是一种腐蚀侵蚀破坏形貌。常发生于冷凝器上排管束外表面,是常压给水进入冷凝器内的真空状态时,产生的高速蒸汽流冲击所致。在腐蚀破坏形貌上明显可见流体机械作用的痕迹</p>
<p>电偶腐蚀:是一种在宏观腐蚀电池作用下的纯电化学腐蚀现象,主要发生于自然腐蚀电位相差较大的不同金属材料互相电连接的情况下,又称接触腐蚀。其腐蚀形貌的主要特点是,腐蚀主要发生在组成电偶的阳极性金属材料上,而阴极性金属材料通常是被保护的</p>		
电偶腐蚀		<p>电偶腐蚀没有专门表示电偶腐蚀特征的腐蚀形貌,所有前述的腐蚀形貌都可能发生,且都因电偶腐蚀的叠加作用而变得更加迅速,更加严重</p>
<p>缝隙腐蚀也是一种在宏观腐蚀电池作用下的电化学腐蚀现象,缝隙的形成有四种情况:结构缝隙、覆盖层下、沉积物下和附着生物下面。缝隙腐蚀也没有专门表示缝隙腐蚀特征的腐蚀形貌,只是在腐蚀破损区的分布方面与缝隙有关</p>		
缝隙腐蚀		<p>腐蚀发生在 00Cr18Ni9Ti 不锈钢管与 645-III 钢管板形成的缝隙内,645-III 钢管板发生腐蚀,是与电偶腐蚀联合作用所导致的腐蚀,同时可见一个溃瘍腐蚀坑</p>
<p>杂散电流腐蚀:金属材料在腐蚀介质中遭到杂散电流作用时,电流流出部位会发生严重腐蚀</p>		
杂散电流腐蚀		<p>腐蚀区主要呈现溃瘍腐蚀形貌。当杂散电流不是连续的,而是断续的时,可能出现杂散电流腐蚀所特有的阶段性扩展形貌</p>

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 水冷却系统在工业领域中的重要性	1
1.2 开展水冷却系统腐蚀及其控制研究的必要性	1
1.3 我国水冷却系统的腐蚀及其控制历史	2
1.4 我国水冷却系统的腐蚀及其控制现状	3
1.5 我国水冷却系统腐蚀及其控制的发展趋势	4
1.6 水冷却系统腐蚀及其控制方面的任务	5
1.6.1 加强腐蚀控制的管理	6
1.6.2 普及腐蚀及其控制的基本知识	6
1.6.3 积累常用的腐蚀数据和腐蚀事故分析资料	7
1.6.4 研究、提高、推广使用腐蚀控制新技术	7
1.6.5 加强腐蚀事故调查、分析和研究	8
1.7 撰写本书的目的和本书的特点	8
参考文献	9
第 2 章 船舶海水冷却系统的腐蚀	10
2.1 船舶水冷却系统的组成	10
2.1.1 主水冷却系统	11
2.1.2 副水冷却系统	11
2.1.3 制冷系统	11
2.1.4 空调水冷却系统	11
2.2 船舶海水管路系统的腐蚀	12
2.2.1 管路系统的腐蚀环境特点	12
2.2.2 海水管路腐蚀调查案例	13
2.2.3 船舶海水管路系统的腐蚀破损规律	20
2.3 船舶海水冷却设备的腐蚀	24
2.3.1 冷却设备的腐蚀环境分析	25
2.3.2 船舶冷却设备的腐蚀案例	26
2.3.3 船舶冷却设备的腐蚀破损规律	30
2.4 其他设备的腐蚀	30
2.4.1 海水滤器的腐蚀破损分析	30
2.4.2 阀门的腐蚀破损案例	31
参考文献	35
第 3 章 滨海电厂海水冷却系统的腐蚀	36
3.1 电厂海水冷却系统的腐蚀概况	37

3.1.1	大港电厂水冷却系统的流程、材料、结构简介	37
3.1.2	大港电厂水冷却系统的腐蚀调查	38
3.1.3	大港电厂海水冷却系统的腐蚀破坏规律	39
3.2	电厂凝汽器的腐蚀问题	40
3.2.1	异种金属间的电偶腐蚀	40
3.2.2	冷凝管端的冲击腐蚀	41
3.2.3	黄铜管的脱锌腐蚀	41
3.2.4	冷凝管的点蚀	41
3.2.5	胀管引起的腐蚀	41
3.2.6	羊口盐场第二发电厂凝汽器的腐蚀情况	41
3.2.7	大连石油七厂海水冷却设备的腐蚀破损情况	42
3.3	电厂凝汽器管束的腐蚀问题	43
3.3.1	金山电厂凝汽器管束的腐蚀破损调查	43
3.3.2	杭州湾畔诸电厂冷凝器管束装机试验	44
3.3.3	镇海电厂钛管束凝汽器的腐蚀问题	46
3.4	电厂海水输送管路的腐蚀破损	46
3.5	其他设备或装置的腐蚀	47
	参考文献	48
第4章	水冷却系统中常见的腐蚀类型及其腐蚀机理	49
4.1	海水腐蚀机理及其影响因素	49
4.1.1	溶解氧含量	50
4.1.2	含盐量	51
4.1.3	电导率	51
4.1.4	温度	52
4.1.5	pH 值的影响	52
4.1.6	生物的影响	53
4.1.7	其他环境因素对金属在海水中腐蚀的影响	53
4.2	几种局部腐蚀机理及其对水冷却系统腐蚀行为的影响	54
4.2.1	缝隙腐蚀	54
4.2.2	电偶腐蚀	56
4.2.3	脱成分腐蚀	63
4.2.4	污水系统的腐蚀	65
4.2.5	水滞留区腐蚀	66
4.3	流动海水腐蚀机理及主要影响因素	67
4.3.1	与流动海水腐蚀有关的术语及其定义	67
4.3.2	海水流速对金属腐蚀机理的影响	67
4.3.3	侵蚀腐蚀和腐蚀侵蚀	69
4.3.4	流动海水中的腐蚀形貌特点	71
4.3.5	流动水中影响腐蚀的主要因素	73