

火力发电厂 设备腐蚀与防护技术



刘世念 苏伟 张波 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

火力发电厂 设备腐蚀与防护技术

刘世念 苏伟 张波 魏增福 编著
卢国华 范圣平 付强 杨海洋



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要涉及火力发电厂设备的腐蚀和防护的内容。首先叙述了火力发电厂所处的腐蚀环境、腐蚀的影响因素、腐蚀的主要形式和防腐蚀技术,从原理上阐述了火力发电厂设备所用材料的腐蚀,分析了热力汽水系统、冷却水系统、烟气脱硫和脱硝系统、酸碱系统和电力用油系统的设备腐蚀分析和防护方法,阐述了火力发电厂设备常用材料型号和特征,最后介绍了火力发电厂设备腐蚀监测和检测技术、腐蚀失效分析与腐蚀监控技术。

本书紧密联系火力发电厂设备腐蚀与防护,系统地介绍了腐蚀类型、原理和解决方法,具有较强的实用性,适合从事电力行业火力发电厂腐蚀与防护运行维护的技术人员、研究人员使用,可作为相关人员的培训教材和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

火力发电厂设备腐蚀与防护技术 / 刘世念等编著. —北京:
中国电力出版社, 2015.1
ISBN 978-7-5123-6884-2

I. ①火… II. ①刘… III. ①火电厂—生产设备—防腐 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 290149 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 1 月第一版 2015 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.25 印张 224 千字
印数 0001—2500 册 定价 38.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

腐蚀是一个渐变过程，在初期一般并未引起人们的重视，但腐蚀造成的损害却是巨大的。就实际运行经验来看，在火电发电厂的热力汽水系统、冷却水系统、烟气脱硫和脱硝系统、酸碱系统和电力用油系统等都常发生腐蚀。随着电力工业的迅速发展和技术装备水平的提高，大容量、高参数高效环保机组不断增多，火电机组的设备因处于高温、高腐蚀性介质等特殊环境中易发生腐蚀，因此，设备腐蚀与防护对于保证电厂的安全运行和设备的维护有极其重要的作用。

本书内容分为五章，主要包括火电厂所处的腐蚀环境、腐蚀的影响因素、腐蚀的主要形式和防腐蚀技术；热力汽水系统、冷却水系统、烟气脱硫和脱硝系统、酸碱系统和电力用油系统的设备腐蚀分析和防护方法；火力发电厂设备常用材料型号和特征；腐蚀监测和检测技术；腐蚀失效分析与腐蚀监控技术。本书内容全面、系统性强，可作为培训教材和参考用书，供电力行业从事火力发电厂腐蚀与防护运行维护的技术人员、研究人员使用。

本书由广东电网有限责任公司电力科学研究院刘世念、苏伟、魏增福、卢国华、范圣平、付强和青岛海洋腐蚀研究所张波、杨海洋等编著。在编写过程中，作者还参考了大量的国内外关于腐蚀与防护方面的论文、专著和资料，限于篇幅，不能在参考文献上一一列出，在此谨向这些论文、专著、资料的作者表示谢意。

电厂设备腐蚀与防护内容丰富且复杂，技术性强，书中难以尽述，只是择其重点加以阐述，限作者水平，书中不妥之处在所难免，恳请专家、同行和读者阅后给予批评和指正。

编 者

2014年11月

前言

1 腐蚀和防护概况	1
1.1 电力设备所用材料简介	1
1.2 腐蚀环境	2
1.2.1 大气腐蚀	2
1.2.2 淡水腐蚀	4
1.2.3 海水腐蚀	4
1.2.4 土壤腐蚀	5
1.2.5 高温腐蚀	6
1.3 腐蚀的影响因素	7
1.3.1 溶解氧	7
1.3.2 二氧化碳	7
1.3.3 氨	8
1.3.4 硫化氢	8
1.3.5 二氧化硫	8
1.3.6 氯	8
1.3.7 pH 值	8
1.3.8 水的流速	8
1.3.9 水的含盐量	8
1.4 腐蚀的主要形式	9
1.4.1 氧腐蚀	9
1.4.2 酸腐蚀	9
1.4.3 点腐蚀	9
1.4.4 应力腐蚀	10
1.4.5 酸式磷酸盐腐蚀	11
1.4.6 介质浓缩腐蚀	11
1.4.7 亚硝酸盐腐蚀	11
1.4.8 汽水腐蚀	11
1.4.9 电偶腐蚀	12
1.4.10 选择性腐蚀	12

1.4.11	晶间腐蚀	13
1.4.12	冲刷腐蚀	14
1.4.13	高、低温腐蚀	14
1.5	防腐蚀技术	15
1.5.1	缓蚀剂保护	15
1.5.2	介质处理	15
1.5.3	电化学保护	16
1.5.4	覆盖层保护	18

2 设备腐蚀分析与防护方法 25

2.1	热力汽水系统	25
2.1.1	热力设备腐蚀概述	25
2.1.2	给水系统	28
2.1.3	锅炉本体设备	37
2.1.4	汽轮机	40
2.1.5	水垢的形成及其防止	41
2.1.6	汽包炉水处理	46
2.1.7	直流炉水处理	56
2.2	冷却水系统	60
2.2.1	金属材质选用原则	60
2.2.2	腐蚀控制指标	61
2.2.3	腐蚀控制方法	62
2.2.4	微生物腐蚀控制方法	65
2.2.5	发电机内冷水的腐蚀控制方法	66
2.2.6	海水冷却塔的防腐蚀措施	74
2.3	烟气脱硫和脱硝系统	79
2.3.1	技术现状	79
2.3.2	腐蚀机理分析	82
2.3.3	烟道的防腐蚀措施	83
2.3.4	烟囱的腐蚀与防护	84
2.4	酸碱系统	89
2.4.1	腐蚀的常见问题	90
2.4.2	防腐工艺改进措施	90
2.4.3	酸碱系统设计规定	91
2.4.4	化学酸洗	92
2.5	电力用油系统	92
2.5.1	用油概况	92

2.5.2	润滑油系统	92
2.5.3	抗燃油系统	96
2.5.4	油的腐蚀和锈蚀	98
2.5.5	用油管理和维护	98

3 火力发电厂设备常用材料 104

3.1	碳钢和合金钢	104
3.1.1	碳素结构钢	104
3.1.2	优质碳素结构钢	104
3.1.3	碳素铸钢	104
3.2	合金结构钢	105
3.2.1	低合金高强度结构钢	105
3.2.2	合金渗碳钢	105
3.2.3	调质钢	105
3.2.4	弹簧钢	105
3.2.5	滚动轴承钢	105
3.3	合金工具钢	106
3.3.1	刃具钢	106
3.3.2	量具钢	106
3.3.3	模具钢	106
3.4	不锈钢	107
3.4.1	马氏体型不锈钢	107
3.4.2	铁素体型不锈钢	107
3.4.3	奥氏体型不锈钢	107
3.4.4	双相不锈钢	108
3.4.5	沉淀硬化型不锈钢	108
3.5	耐磨钢	108
3.5.1	高锰钢	108
3.5.2	低合金耐磨钢	108
3.6	耐热钢	109
3.6.1	珠光体耐热钢	109
3.6.2	马氏体耐热钢	109
3.6.3	奥氏体耐热钢	109
3.6.4	铁素体耐热钢	110
3.7	铸铁	110
3.8	铝合金	111
3.9	铜及铜合金	111

3.9.1	黄铜	111
3.9.2	白铜	111
3.9.3	青铜	112
3.10	钛及钛合金	112
3.11	轴承合金	112
3.11.1	锡基轴承合金	112
3.11.2	铅基轴承合金	113
3.11.3	铜基轴承合金	113
3.11.4	铝基轴承合金	113
3.12	常用材料主要应用范围	113
3.12.1	蒸汽管道、联箱和锅炉受热面钢管	113
3.12.2	锅炉汽包	116
3.12.3	锅炉受热面固定件和吹灰器	118
3.12.4	汽轮机主轴、转子体、轮盘和叶轮及汽轮发电机转子和无磁性护环	119
3.12.5	汽轮机叶片	122
3.12.6	紧固件	124
3.12.7	汽轮机与锅炉铸钢件	125
3.12.8	凝汽器	126

4 腐蚀监测和检测技术 128

4.1	腐蚀监测和检测技术概述	128
4.1.1	挂片法	128
4.1.2	电阻法	128
4.1.3	极化阻力技术	129
4.1.4	探氢针法	130
4.1.5	介质分析法	130
4.1.6	零电阻电流表法	130
4.1.7	电位监测技术	131
4.1.8	警戒孔法	131
4.1.9	无损检测 (NDE) 技术	131
4.1.10	涂层力学性能检测技术	134
4.1.11	腐蚀失效力学性能试验方法	139
4.2	火力发电厂腐蚀与防护技术监督	140
4.3	腐蚀实时监测系统	141
4.3.1	监控系统的基本组成	141
4.3.2	火力发电厂监控系统的应用概况	141
4.3.3	专家系统在火力发电厂的应用概况	142

5.1 腐蚀失效分析	143
5.1.1 现场调查	143
5.1.2 实验分析	144
5.1.3 模拟试验	145
5.1.4 预防措施	145
5.1.5 腐蚀失效分析数据库	145
5.2 腐蚀数据库	146
5.2.1 概述	146
5.2.2 国内腐蚀数据库	147
5.2.3 腐蚀数据库的内容结构	148
5.2.4 腐蚀数据专家系统	149
5.3 腐蚀监控技术	150
5.3.1 零电阻电流表法	151
5.3.2 阳极激发技术	151
5.3.3 电化学阻抗谱法	151
5.3.4 谐振频率测量	151
5.3.5 激光法测定氧化膜厚度	152
5.3.6 薄层活化技术	152
参考文献	153

腐蚀和防护概况

1.1 电力设备所用材料简介

电力设备因为处于高温、高腐蚀性介质等特殊环境中，所以选择材料对于保证电厂的安全运行和设备的维护有极其重要的作用。电力设备常用的金属材料有碳钢及低合金钢、不锈钢、有色金属等。针对锅炉体系、汽轮机体系和交换器体系等金属使用区域，对金属材料有不同的要求。

在锅炉体系中，对于受热面管（包括水冷壁管、省煤器管、过热器管和再热器管等）和蒸汽管道用钢（包括主蒸汽管、再热蒸汽管和导汽管等）要求其要有足够高的蠕变极限、良好的组织稳定性、高抗氧化性能、强耐蚀性能和良好的焊接性能等。常用的受热面管和蒸汽管道用钢主要有 20g、15Mog、15CrMog、12Cr1MoVg、10CrMo910、12Cr2MoWVTiB、T23、T24、10Cr9Mo1VNb、T92、X20CrMoV121、T122、1Cr19Ni9、1Cr9Ni11Nb 等。

锅炉汽包作为锅炉中关键的承压部件，要求有较高的常温强度和中温强度，良好的塑性、韧性和冷弯性能，较低的缺口敏感性，良好的焊接性能和良好的冶金质量等。常用的汽包用钢主要有 20g、12Mng、16Mng、19Mn5、19Mn6、A299、15MnVg、14MnMoVg、18MnMoNbg、13MnNiCrMoNb 等。

而对于锅炉受热面吊挂用钢，要求具有较高的抗氧化性能，一定的热强性能、较强的耐蚀性和工艺性能。对于锅炉吹灰器用钢，要求具有高抗氧化性能、较强的耐蚀性能和小的热脆性。常用的锅炉受热面吊挂和吹灰器用钢主要有 1Cr5Mo、1Cr6Si2Mo、4Cr9Si2、1Cr25Ti、1Cr20Ni14Si2、2Cr20Mn9Ni2Si2N、3Cr18Mn12Si2N、2Mn18Al5SiMoTi 等。

在汽轮机体系中，叶片作为将气流的动能转换为机械能的重要部件，要求有足够的常温和高温力学性能，良好的减振性，良好的组织稳定性，较强的耐蚀性、抗冲蚀性及良好的冷热加工工艺性能等。常用的汽轮机叶片用钢有 1Cr13、2Cr13、1Cr11MoV、1Cr12WMoV、2Cr12NiMoWV、2Cr12NiW1Mo1V、1Cr17Ni2、0Cr17Ni4Cu4Nb 等。

转子作为汽轮机的转动部分，要求材料性能均匀，具有较低的残余应力、良好的力学性能、良好的抗氧化性和耐蒸汽腐蚀性和良好的焊接性等。常用的转子用钢有 17CrMo1V、35CrMoVA、30Cr1Mo1VE、25Cr2NiMoV、30Cr2MoV、30Cr2Ni4MoV、20Cr3MoWV、33Cr3MoWV 等。

汽轮机定子主要包括汽缸、隔板、蒸汽室、喷嘴室等，要求有足够高的室温力学性能、较好的热强性、良好的抗疲劳性能和组织稳定性、一定的抗氧化性、良好的抗蒸汽腐蚀的

能力、良好的铸造性能和焊接性能。常用的汽轮机定子用钢主要有 ZG25、ZG35、ZG22Mn、ZG20CrMo、ZG20CrMoV、ZG15Cr1Mo1V、ZG15Cr2Mo1、ZG1Cr18Ni9Ti 等。

在凝汽器体系中，凝汽器主要通过冷却水使得管外的蒸汽得以冷却，凝结为水，要求传热性能好、有一定强度和较强的耐蚀性等。常用的铜合金有 H68A、HSn70-1、HSn70-1B、HSn70-1AB、HA177-2、BFe30-1-1、BFe10-1-1，常用的钛合金有 TA0、TA1 和 TA2 等，常用的不锈钢有 TP304、TP316、TP317、TP430 等。

1.2 腐 蚀 环 境

电力工业的设备材料根据其所处的腐蚀环境，大致可以分为大气腐蚀、淡水腐蚀和海水腐蚀、土壤腐蚀、高温腐蚀以及其他一些特殊的介质浸泡腐蚀等。

1.2.1 大气腐蚀

大气腐蚀是材料与周围的大气环境相互作用的结果，它与浸没于液体中的材料腐蚀是相同的。在大多数情况下，大气腐蚀是由于潮气在物体表面形成薄水膜而引起的。金属材料在大气中的腐蚀机制主要是大气中所含的水分、氧气和腐蚀性物质（包括雨水的杂质）、表面沉积物等联合作用而引起的破坏。大气腐蚀在大部分情况下是电化学腐蚀。化学腐蚀只是干燥无水分的大气环境中金属表面发生氧化、硫化等造成的变色现象。

大气的相对湿度是影响大气腐蚀最主要的因素之一。大气腐蚀实质上是一种水膜下的化学反应。空气中水分在金属表面凝聚生成的水膜和空气中氧气通过水膜进入金属表面是发生大气腐蚀最基本的条件。

大气中的污染物对腐蚀的影响很大。如海洋大气中的海盐粒子、工业大气中的二氧化硫和尘埃等。空气中的这些杂质溶于金属表面液膜中，这层液膜就成了腐蚀性电解质，加速了金属的腐蚀。

根据污染物的性质和污染程度，大气环境一般划分为工业大气、海洋大气、海洋工业大气、城市大气和乡村大气。

乡村大气中不含有强烈的化学污染物质，但含有有机物和无机物尘埃。空气的主要成分包括水分、氧气及二氧化碳等，大气腐蚀相对较弱。影响腐蚀的因素主要是大气环境中的相对湿度、温度和温差。

工业大气是被化学物质污染的大气。工业大气来源于化工、石油、冶炼、水泥等多种工业。含有硫化物是工业大气的典型特征。硫化物来源于工业和生活的燃料燃烧后所释放出来的二氧化硫（ SO_2 ）。它被灰尘吸附或直接溶于金属表面的液膜里，就成了强腐蚀介质，生成易溶性亚硫酸盐，而这又会引起和加速催化腐蚀作用。相对湿度的增加，对二氧化硫腐蚀的促进作用更为明显。

火力发电生产过程中所造成的大气腐蚀是典型的工业大气环境腐蚀。火力发电厂在运行过程中，释放出大量硫化物等腐蚀性气体，与空气中的水汽或雨水相结合形成酸性溶液，煤灰在钢结构上面的沉积，会形成电解质，这些都会加速钢结构的电化学腐蚀。而且，煤

粉中炭的电极电位相对于钢铁来说要高出许多，会与钢铁形成腐蚀性原电池。

海洋性大气环境的相对湿度大，大气中含有海盐粒子。海盐粒子沉降在金属表面上及表面上原有的盐分与金属腐蚀物都具有很强的吸湿性，会溶于水膜中形成强腐蚀介质。而且海盐粒子为氯化物，渗透腐蚀性强，可以渗进钝化膜腐蚀底材，即使是不锈钢，也会因而产生点蚀。处于海滨地区的工业大气环境，属于海洋性工业大气，这种大气中既含有化学污染的有害物质又含有海洋环境的海盐粒子。两种腐蚀介质对金属危害更重。因此，滨海电厂的腐蚀问题要比内地或城市边缘的电厂更严重。

按照环境腐蚀的严酷性程度对腐蚀环境进行分类，可参照相关的分类标准。如 GB/T 15957—1995《大气环境腐蚀性分类》、GB/T 19292.1—2003《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 分类》及 GB/T 30790.2—2014《色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第2部分：环境分类》(ISO 12944-2: 1998)等。

随着大气环境中腐蚀性因子的浓度变化，大气腐蚀环境会不同，而这个浓度变化与世界各地的技术发展和技术行为有很大的关系。不同的国家和地区的发展水平不同，利用的技术和对污染治理的重视程度不同，大气腐蚀环境就会有很大区别。因此，腐蚀科学家进行了腐蚀性的定量测试工作，但是它并不能用于预测腐蚀速率。国际标准化组织颁布了 ISO 9223: 1992~ISO 9226: 1992 系列标准，对大气腐蚀进行两种方法的分类 (ISO 9223: 1992)，即根据金属标准试件在环境中自然暴露试验获得的腐蚀速率进行分类 (测试标准为 ISO 9225: 1992)，以及综合环境中大气污染物浓度和金属表面润湿时间进行环境分类 (ISO 9226: 1992)。ISO 9224: 1992 为特殊金属的每种腐蚀类型的腐蚀速率参考值。

按金属标准试样腐蚀速率进行分类，ISO 9223: 1992 把大气腐蚀分为 5 类，即 C1 级，腐蚀程度很低；C2 级，腐蚀程度低；C3 级，腐蚀程度中；C4 级，腐蚀程度高；C5 级，腐蚀程度很高，见表 1-1。该分类标准与 ISO 12944: 1992 钢结构的保护涂层腐蚀防护相对应，C1~C5 级都规定了不同的涂料系统和干膜厚度。GB/T 19292.1—2003《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 分类》等同于采用国际标准 ISO 9223: 1992。

表 1-1 不同金属暴露第一年的腐蚀速率 (ISO 9223: 1992)

腐蚀性类别	金属的腐蚀速率				
	单位	碳钢	锌	铜	铅
C1	g/(m ² ·a)	<10	<0.7	<0.9	
	μm/a	<1.3	<0.1	<0.2	<0.2
C2	g/(m ² ·a)	10~200	0.7~5	0.9~5	
	μm/a	1.3~25	0.1~0.7	0.1~0.6	
C3	g/(m ² ·a)	200~400	5~15	5~12	
	μm/a	25~50	0.7~2.1	0.6~1.3	0.6~1.3
C4	g/(m ² ·a)	400~650	15~30	12~25	
	μm/a	50~80	2.1~4.2	1.3~2.8	
C5	g/(m ² ·a)	650~1500	30~60	25~50	
	μm/a	80~200	4.2~8.4	2.8~5.6	

按照污染物浓度和润湿时间进行环境分类,通过环境中 SO_2 、 Cl^- 的浓度及试样上潮湿时间测定,首先区分污染环境类型和润湿时间类型,然后将环境污染类型和润湿时间类型综合起来评定腐蚀类型。

1.2.2 淡水腐蚀

淡水是指含盐量较低的天然水,一般呈中性。淡水是工业发展的重要条件,包括环境卫生用水、饮用水、锅炉用水、冷却用水等。在淡水中的腐蚀是氧去极化腐蚀,即吸氧腐蚀。水中足够的溶解氧的存在是金属腐蚀的最根本原因。

淡水含盐量低,导电性差,电化学腐蚀的电阻比在海水中大。由于淡水的电阻大,淡水中的腐蚀主要以微电池腐蚀为主。淡水中钢铁的腐蚀受环境影响较大,如水的 pH 值、溶解氧浓度、水的流速及泥砂含量、水中的溶解盐类和微生物等。

淡水的 $\text{pH}=4\sim 10$ 时,溶解氧的扩散速度几乎不变,碳钢的腐蚀速度也基本保持恒定。当 $\text{pH}<4$ 时,覆盖层溶解,阴极反应既有吸氧又有析氢过程,腐蚀不再单纯受氧浓差扩散控制,而是两个阴极反应的综合,腐蚀速度显著增大。当 $\text{pH}>10$ 时,碳钢表面钝化,腐蚀速度下降,但是当 $\text{pH}>13$ 时,碱度太大可以造成碱腐蚀。

淡水中溶解氧的浓度较低时,碳钢的腐蚀速度随水中的氧浓度增加而升高;但是当水中氧浓度高且不存在破坏钝态的活性离子时,会使碳钢钝化而使腐蚀速度剧减。溶解氧作为阴极去极化剂将铁氧化成 Fe^{2+} ,起到促进腐蚀的作用;氧使水中的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 氧化为铁锈 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 等的混合物,在一定条件下铁表面起到抑制腐蚀的作用。

随着水流的加速,腐蚀速度会增加,水中泥砂含量大时,又会加剧冲刷腐蚀。钢结构材料长期浸于水中,有的由于水位变化或处于干湿交替的环境,有的会受到高速水流的冲击和泥沙、漂浮物、冰凌的摩擦,位于水面或水上部分还受到水蒸发的潮湿气氛和飞溅的水雾作用;处于大气中还受到日光、空气的作用。钢材很容易腐蚀,显著降低了钢结构性能。

1.2.3 海水腐蚀

海水是一种含有多种盐类的电解质溶液,含盐量约为 3%,其中的氯化物含量占总盐量的 88.7%,pH 值为 8 左右,并溶有一定量的氧气。除了镁及其合金外,大部分金属材料在海水中都是氧去极化腐蚀。其主要特点是海水中氯离子含量很大,因此,大多数金属在海水中阳极极化阻滞很小,腐蚀速度相当高;海浪、飞溅和流速等这些利于供氧的环境条件都会促进氧的阴极去极化反应,促进金属的腐蚀。因为海水电导率很大,所以不仅腐蚀微电池活性大,宏电池的活性也很大。海水中不同金属相接触时,很容易发生电偶腐蚀。即使两种金属相距数十米,只要存在电位差,并实现电联结,就可能发生电偶腐蚀。

海水中溶有大量以氯化钠为主的盐类。海水的含盐量以盐度来表示,盐度是指 1000g 海水中溶解的固体盐类物质的总克数。含盐量影响到水的电导率和含氧量,因此,对腐蚀有很大影响。海水中所含盐分几乎都处于电离状态,这使得海水成为一种导电性很强的电解质溶液。另外,海水中存在大量的氯离子,对金属的钝化起破坏作用,也促进了金属

的腐蚀。对于在海水中的不锈钢和其他合金材料，点蚀是常见的现象。

由于氧去极化腐蚀是海水腐蚀的主要形式，所以海水中溶解氧的含量是影响海水腐蚀的主要因素。随着盐度增加和温度升高，溶解氧含量会降低。

海水温度升高，氧的扩散速度加快，海水电导率增大，加速了阴极和阳极的反应，即腐蚀加速。海水温度随着纬度、季节和深度的不同而变化。

海水的波浪和流速改变了供氧条件，使氧到达金属表面的速度加快。金属表面腐蚀产物所形成的保护膜被冲掉，金属基体也受到了机械性损伤。在腐蚀和机械力的相互作用下，金属腐蚀速度急剧增加。

海洋中存在着多种动植物和微生物，它们的生命活动会改变金属—海水界面的状态和介质性质，对腐蚀产生不可忽视的影响。海生物的附着会引起附着层内外的氧浓差电池腐蚀。某些海生物的生长会破坏金属表面的涂料等保护层。在波浪和水流的作用下，可能引起涂层的剥落。表 1-2 是碳钢 Q235B 在青岛海域实海中（全浸区）暴露 16 年的腐蚀数据。表 1-3 列举了部分材料在青岛实海全浸区暴露 16 年的腐蚀速率。

表 1-2 Q235B 在青岛海域实海中（全浸区）暴露 16 年的腐蚀数据

暴露时间 (年)	腐蚀率 (mm/年)	平均点蚀深度 (mm)	最大点蚀深度 (mm)	腐蚀类型
1	0.19	0.41	0.80	溃疡腐蚀
2	0.16	1.02	1.51	点蚀；溃疡腐蚀
4	0.14	1.15	1.72	点蚀；溃疡腐蚀
8	0.11	1.14	2.25	斑蚀；溃疡腐蚀
16	0.10	1.41	2.70	斑蚀；溃疡腐蚀

表 1-3 材料在青岛实海全浸区暴露 16 年的腐蚀率 mm/年

管材	暴露时间 (年)				
	1	2	4	8	16
Q235B	0.19	0.16	0.14	0.11	0.10
14MnMoNbB	0.17	0.13	0.13	0.11	0.086
1Cr18Ni9Ti	0.008	0.013	0.0075	0.0041	0.0069
000Cr18Mo2	0.0009	0.000 13	0.000 38	0.000 23	0.000 11
H68A	0.024	0.012	0.0089	0.006	0.0043
HSn70-1A	0.023	0.016	0.0075	0.0059	0.0047
HA177-2A	0.0048	0.0037	0.0019	0.002	0.0017
BFe10-1-1	0.018	0.011	0.0069	0.0035	0.0047
BFe30-1-1	0.021	0.011	0.0061	0.0036	0.0024

1.2.4 土壤腐蚀

土壤是由气相、液相和固相所构成的一个复杂系统，其中还生存着很多土壤微生物。影响土壤腐蚀的因素很多，如孔隙度、电阻率、含氧量、盐分、水分、pH 值、温度、微生物和杂散电流等，各种因素又会相互作用。因此，土壤腐蚀是一个十分复杂的腐蚀问题。

土壤的透气性好坏与土壤的孔隙度、松紧度、土质结构有着密切关系。紧密的土壤中氧气的传递速度较慢，疏松的土壤中氧气的传递速度较快。在含氧量不同的土壤中，容易产生浓差极化形成微电池从而导致金属材料的腐蚀。

土壤中的盐分除了对土壤腐蚀介质的导电过程起作用外，还参与电化学反应，从而影响土壤的腐蚀性，它是电解液的主要成分。含盐量越高，电阻率越低，腐蚀性就越强。氯离子对土壤腐蚀有促进作用。

电阻率是土壤腐蚀的综合性因素。土壤的含水量、含盐量、土质、温度等都会影响土壤的电阻率。土壤含水率未饱和时，土壤电阻率随含水量的增加而减小。当达到饱和时，由于土壤孔隙中的空气被水所填满，含水量增加时，电阻率也增大。

水分使土壤成为电解质，是造成电化学腐蚀的先决条件。土壤中的含水量对金属材料的腐蚀率存在着一个最大值。当含水量低时，腐蚀速率随着含水量的增加而增加。达到某一含水量时腐蚀速率最大，再增加含水量，其腐蚀性反而下降。

土壤的酸碱性（指标是 pH 值）是土壤中所含盐分的综合反映。金属材料在酸性较强的土壤中腐蚀最强，这是因为在强酸条件下，氢的阴极极化过程得以顺利进行，强化了整个腐蚀过程。中性和碱性土壤中，腐蚀程度较小。

土壤温度是通过影响土壤的物理、化学性质来影响土壤的腐蚀性的。它可以影响土壤的含水量、电阻率、微生物等。温度低，电阻率增大；温度高，电阻率减小。温度的升高使微生物活跃起来，从而增大对金属材料的腐蚀。

土壤中的微生物会促进金属材料的腐蚀过程，还能降低非金属材料的稳定性能。好氧菌，如硫氧化细菌的生长，能氧化厌氧菌的代谢产物，产生硫酸，破坏金属材料的保护膜，使之发生腐蚀。在金属表面形成的菌落在代谢过程中消耗周围的氧，会形成一个局部缺氧区，与氧浓度高的周围或阴极区形成氧浓差电池，提高腐蚀速率。厌氧的硫酸盐还原菌（SRB）趋向于在钢铁附近聚集，有着阴极去极化作用，加速钢铁的腐蚀。

杂散电流是指在规定的电路之外流动的电流，是土壤介质中存在的一种大小和方向都不固定的电流，大部分是直流电杂散电流。它来源于电气化铁路、电车及地下电缆的漏电，电焊机等。直流干扰腐蚀的机理是电解作用使处于腐蚀电池阳极区的金属体被腐蚀。对于埋地管道来说，电流从土壤进入金属管路的地方带有负电，从而成为阴极区，由管路流出的部位带正电，该区域为阳极区，铁离子会溶入土壤中而受到严重的局部腐蚀。而阴极区很容易发生析氢，造成表面防护涂层的脱落。

1.2.5 高温腐蚀

高温腐蚀与在低温环境、液体电解质下发生的腐蚀不同，在高温环境下金属材料的腐蚀主要在干燥气体和高温气体氛围中发生，其中高温氧化腐蚀最为常见。

高温氧化的第一步是氧吸附在金属表面上，随后是氧化物形成核和晶核长大，生成覆盖金属基体的连续氧化膜。随着膜厚增加，微裂纹、宏观裂纹和孔隙等缺陷就可能在膜中发展，使氧化膜失去保护性。缺陷的存在使氧可以更容易到达金属基体而引起进一步氧化。

氧化膜所提供的保护程度的一个重要参数是 PB（Pilling-Bedworth）比，即生成氧化物

的体积与所消耗的金属体积比。当 PB 比稍大于 1 时，耐氧化性最为理想。

金属在高温气体中的腐蚀也是一个电化学过程，阳极反应是金属离子化，它在膜与金属界面处发生，可以看作是阳极。阴极反应（氧的离子化）是在膜与气体界面处发生的，那里相当于阴极。与低温湿腐蚀相比，两者较为相似。两者的区别是在电解质溶液中金属与水结合为水合离子，氧变成 OH^- 的反应也需要水或水合离子参加；在高温腐蚀中，金属和氧则直接离子化。

硫化也是高温腐蚀的一种机理。硫化与含硫化物污染的存在有很大关系。由于有机硫化物，如硫醇、多硫化物及元素硫等的存在，它们会部分地转化为硫化氢，在 $260\sim 288^\circ\text{C}$ 时，氢的存在使硫化氢变得极具腐蚀性。提高温度和硫化氢含量一般会导致更快的破坏速率，当温度升高到 55°C 时，硫化速率将会加倍。

高温下当金属暴露在一氧化碳、甲烷、乙烷或其碳氢化合物中时，会发生碳化。碳化通常只在 815°C 以上的温度范围时才会发生。

金属的粉化也是高温腐蚀的一种形式，它与碳化有关，其腐蚀产物为细小的粉末，它们由碳化物、氧化物和石墨组成。腐蚀形态为局部点蚀或相对均匀的腐蚀破坏。金属发生粉化的典型温度区间是 $425\sim 815^\circ\text{C}$ 。金属粉化一般与富含 CO 和 H 的气体介质有关。

除了以上高温腐蚀机理和现象外，还有氮化、气态卤素腐蚀和熔盐腐蚀等。高温腐蚀表面形成的燃灰或盐的沉积，又会导致保护性表面氧化物的破坏和高速腐蚀。

1.3 腐蚀的影响因素

1.3.1 溶解氧

在火力发电厂设备中，发生氧腐蚀的部位为给水管道和省煤器。在各给水组成部分中，补给水的输送管道以及疏水的储存设备和输送管道都会发生严重的氧腐蚀，凝结水系统不易发生氧腐蚀。

氧在中性水中对一些金属的腐蚀起着阴极去极化的作用，促进金属的腐蚀，除去氧后，介质腐蚀降低。而有时氧又可以作为氧化性钝化剂，使得金属钝化，免于腐蚀。例如，对于碳钢等非钝化金属材料，在水对钢铁的腐蚀过程中，溶解氧的浓度是腐蚀速度的控制因素，氧的增加促进碳钢腐蚀速率的增大；而对于铝和不锈钢等钝化金属，氧化膜的生长有利于降低腐蚀速率。

1.3.2 二氧化碳

二氧化碳来源于大气中的二氧化碳和水中的有机物质的分解物。二氧化碳溶于水，生成碳酸或碳酸氢盐，使水的 pH 值下降、水的酸性增加，将有助于氢的析出和金属表面膜的溶解破坏。特别是当水中溶解氧含量较大时，二氧化碳成为溶解氧加速侵蚀金属的催化剂。在火力发电厂热力系统中，最容易发生二氧化碳腐蚀的部位是凝结水系统。

1.3.3 氨

氨含量高时，氨能与铜离子形成稳定的铜氨络合物。当氨的浓度较大，同时存在溶解氧时，就会导致铜的腐蚀。氨对发电机铜导线的腐蚀速度与氨含量有关，发电机组的凝结水氨含量不高（约 1mg/L），并且内冷水水质受电导率控制，也不发生氨的浓缩，因此，向内冷水中补凝结水，一般不会发生氨蚀。往内冷水补加氨的除盐水会使氨的含量达 10~100mg/L，此时只有对电导率进行严格控制，才能避免氨蚀的发生。

1.3.4 硫化氢

硫化氢主要由大气污染、有机体污染、水中微生物引起，促进材料的点蚀。硫化氢是生活污水内腐蚀的主要因素之一。目前，火力发电厂的循环水、泵的冷却水使用城市中水，碳钢材料的水箱、水管均会出现腐蚀，有的锈蚀会很严重。补充水为城市中水的脱硫工艺水管壁均产生锈瘤，严重的导致腐蚀穿孔、结垢，缩短了管道使用寿命。同时，腐蚀产物大大减小管道过水断面，增大管道阻力系数，增加运行成本。

1.3.5 二氧化硫

二氧化硫会促进氢去极化，增加金属的腐蚀趋势。腐蚀通常发生在烟道及脱硫系统。

1.3.6 氯

氯主要存在于循环水系统中，对于碳钢来说，随着余氯的增加，腐蚀速率增加。对于含镍铸铁和铜基合金，水中余氯浓度小于或等于 2mg/L 时，影响不大；而不锈钢可耐氯腐蚀，316L 不锈钢能耐海水腐蚀。

1.3.7 pH 值

对于金属来说，pH 值在不同区间影响不同。以铁为例，当 pH 值很低时，腐蚀由氢去极化控制，pH 值越低，腐蚀速度越大；当 pH 值在中性点附近时，腐蚀由氧去极化控制，腐蚀速度随 pH 值的变化很小；当 pH 值较高时，由于钝化膜保护作用，随着 pH 值的增大，腐蚀速度降低；而当 pH>13 以后，由于 HFeO_2^- 的生成，随着 pH 值的增大，腐蚀速度上升。

1.3.8 水的流速

一般来说，水的流速越大，水中各种物质扩散的速度也越快，从而使腐蚀速度加快。

1.3.9 水的含盐量

金属在水中的腐蚀速度是随着水的含盐量的增加而增大的。如对一个特定的水质来讲，含盐量增加，其水中腐蚀性的氯离子、硫酸根离子、导电率等相应增加，对金属材料的腐蚀性趋于上升。