

刘新编



电力工业 防腐涂装 技术

DIANLI GONGYE
FANGFU

TUZHUANG JISHU

试验所

9



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

76

3025125

作为一直在防腐蚀涂料涂装
是最近几年来在电力行业的防腐蚀
材料、涂装技术、防腐涂料、防腐
防护工作的工程技术人员、防腐
地介绍防腐蚀涂

考虑到本书的读者是VFP初学者，对数据库系统并不了解，所以书中适当介绍了这方面的知识：

防

由于作者自

刘新编

刘新编

电力工业 防腐涂装 技术

TUZHUANG JISHU



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书结合作者多年电力行业防腐涂装工作的经验,较为全面地介绍了防腐蚀涂料、涂装在电力行业中的应用,内容包括电力工业的腐蚀,防腐蚀涂料,防腐涂装表面处理,钢结构,循环水管防腐涂装以及冷却塔、烟囱、烟气脱硫系统、风力发电场、核电站、水工结构防腐其他电力设施防腐涂装等。

本书可为从事电力工业腐蚀防护工作的工程师、监理、施工、技术人员和管理人员提供有力的技术指导,也可供相关产品的生产制造厂家学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力工业防腐涂装技术/刘新编. —北京:中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-9458-9

I. 电… II. 刘… III. ①电力工业—设备—防腐—涂料—技术培训—教材②电力工业—设备—防腐—涂漆—技术培训—教材 IV. TM62 TQ639

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 174467 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 347 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

敬告读者

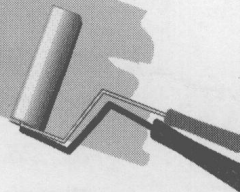
本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

电力工业防腐涂装技术

电力工业防腐涂装技术



本书重点介绍的是电力工业中的防腐蚀涂料对腐蚀的控制与防护,主要介绍了火力发电厂、风力发电场、水电站以及核电站等钢结构以及混凝土的腐蚀防护涂装工艺。同时介绍了金属热喷涂技术,对阴极保护的介绍则不在本书的范围之内。

长期以来,我国在很多行业沿用的有关防腐蚀涂料方面的技术标准过于落后。由于实际技术发展,我国的诸多行业,包括电力系统在内,采用的新技术、新要求、新的实践越来越多。所幸最近几年电力行业已经开始修订了一系列标准,包括防腐蚀涂料在内。并且在没有相应标准的情况下,相关电力设施也开始实践性地采用国外的先进涂料、涂装技术和管理模式。

作为一直在防腐蚀涂料涂装领域工作的腐蚀防护工作者,作者总结了近20年来,特别是最近几年来在电力行业的防腐蚀涂料涂装方面的经验,较为全面地从腐蚀基本原理、涂料材料、涂装技术和质量控制方面,结合电力系统的不同装置和设备等,给从事电力工业腐蚀防护工作的工程师、业主、监理、施工人员、技术人员和管理人员等提供指导,简单地介绍防腐蚀涂料和涂装技术在电力行业中的应用。

考虑到本书的读者群并不局限于电力系统,涂料生产厂商、涂装工程技术人员等对电力系统并不了解,所以书中适当地用少量文字结合防腐蚀的要求介绍了一些电力系统本身的基本知识。

在编写烟气脱硫工程的内容时,参考了天华化工机械及自动化研究设计院、靖江王子橡胶有限公司、佐敦涂料等的相关资料。特别感谢李荣俊先生无私地提供了风电和水电防腐的宝贵资料,使这本书增色不少。书中引用的很多研究文献资料,已在书后列出了参考目录,在此表示衷心感谢。

由于作者自身水平有限,书中难免会有一些谬误和疏漏,恳请专家和读者批评指正。

刘新

2009年8月

第四章 钢结构

第一节 钢结构防腐涂料系统设计

第二节 钢结构防腐蚀涂料系统

第三节 钢结构的防腐施工

目 录

电力工业防腐涂装技术

前言	1
第一章 电力工业的腐蚀	1
第一节 电力工业概述	1
第二节 腐蚀的基本原理	2
第三节 腐蚀的基本类型	4
第四节 腐蚀环境的分类	8
第二章 防腐蚀涂料	14
第一节 防腐蚀涂料概述	14
第二节 沥青类涂料	18
第三节 醇酸树脂涂料	19
第四节 环氧树脂涂料	20
第五节 聚氨酯涂料	22
第六节 含氯聚合物涂料	23
第七节 丙烯酸树脂涂料	26
第八节 喷涂聚脲弹性体	27
第九节 乙烯基酯玻璃鳞片涂料	28
第三章 防腐涂装表面处理	31
第一节 表面处理的对象及程序	31
第二节 手工和动力工具打磨	34
第三节 抛丸清理	36
第四节 喷射清理	41
第五节 喷射清理磨料	45
第六节 酸洗处理	48
第七节 磷化处理	51
第八节 钢材表面除锈标准	53
第四章 钢结构	60
第一节 钢结构防腐涂料系统设计	60
第二节 钢结构防腐蚀涂料系统	64
第三节 钢结构的防腐施工	68

第五章 循环水管防腐涂装	78
第一节 循环水管的腐蚀特点	78
第二节 循环水管的防腐涂层	81
第三节 循环水管的防腐涂装	90
第六章 冷却塔	95
第一节 冷却塔的腐蚀	95
第二节 冷却塔防腐涂料的选用	102
第三节 冷却塔防腐涂装	104
第七章 烟囱防腐涂装	109
第一节 烟囱内壁的腐蚀	109
第二节 烟囱内衬防腐材料	113
第三节 钢烟囱外壁和烟囱航空标志	119
第八章 烟气脱硫系统腐蚀与防护	121
第一节 燃煤中的含硫成分	121
第二节 烟气脱硫的工艺和腐蚀机理	122
第三节 脱硫系统耐蚀材料	127
第四节 湿法烟气脱硫系统防腐方案	131
第五节 海水脱硫防腐方案	138
第九章 风力发电场	141
第一节 风力发电概述	141
第二节 风力发电场的腐蚀环境	143
第三节 风电钢结构的涂料系统性能要求	147
第四节 陆地风电场防腐涂料系统	148
第五节 海上风电场防腐涂装系统	153
第六节 风能公司塔筒涂装系统	155
第十章 核电站	157
第一节 核电概述	157
第二节 核电站安全壳内防护涂料	158
第三节 核岛区域涂装施工要求	171
第四节 BOP 钢结构	176
第五节 AP 1000 核电站的涂料系统	178

第十一章 水工结构	181
第一节 水工结构的腐蚀防护	181
第二节 水工结构的工作环境	183
第三节 水工结构的金属热喷涂腐蚀防护	188
第四节 水工金属结构防腐蚀设计	195
第十二章 其他电力设施防腐涂装	210
第一节 输煤设备和系统	210
第二节 码头钢管桩	212
第三节 码头混凝土结构	215
第四节 输变电塔	220
第五节 变压器	222
第六节 除盐水箱	225
参考文献	226

热、光或动力的能源,如石油、煤炭、天然气、水力、核能、风能、海洋能等。一次能源可以通过转换成为优质的二次能源——电能。

电能通过变电所、配电设备和高压输电线路,通过电力网络输送到用户。电能可以转化为光能、声能、热能、机械能和化学能等。以电能作为动力可以有效地提高各行各业的生产自动化水平;促进技术进步,提高劳动生产率和人民的物质文化生活水平。

按照所使用的一次能源划分,电力工业可以分为以煤、油和天然气为燃料的火力发电厂,以水能作为动力的水力发电厂,以原子核裂变释放能量转变成电能的核电厂,把风能转变为电能的风电场,还有燃气—蒸汽联合循环发电厂、抽水蓄能电厂、太阳能发电厂、地热发电厂、潮汐能发电厂等。目前电力工业占主导地位的主要是火力发电、水力发电、风力发电和核电。

以煤、油和天然气为燃料的电厂称为火力发电厂,简称火电厂(见图1-1),其中煤是我国火力发电厂最主要的燃料。我国电力生产能源结构是以煤为主,燃煤机组燃烧过程中排放的粉尘、灰渣和烟气会对环境产生不利影响。为了提高火力发电的经济性,现在的发展趋势是机组朝高参数、大容量方向发展。超临界600MW火力发电机组已经在我国得到迅速发展,1000MW的超超临界机组也已经开始建设。火电厂是一个复杂的腐蚀环境,除了由于燃煤引起的严重钢结构大气腐蚀(包括厂房钢结构、锅炉岛钢结构、吊机、输煤栈桥和堆取料机等),还涉及到各类储罐内壁腐蚀、循环水管外壁和内壁、高温绝热部位、烟囱内外壁的腐蚀,以及腐蚀环境最为恶劣的烟气脱硫FGD(Fuel Gas Desulfurization)系统。

以水能作为动力发电的电厂叫水力发电厂,又称为水电站。其生产过程是由拦河坝维持的高水位的水,经压力水管进入水轮机推动转子旋转,将水能转化成机械能,水轮机带动发电机旋转,从而使机械能变为电能。在水轮机中做完功后的水经尾水管排入下游。除了大坝蓄水外,还有抽水蓄能电站,它将电力负荷低谷时的多余电能转换为

第一章 电力工业的腐蚀

第一节 电力工业概述

电力是国民经济发展的命脉，以电力工业的发展速度和电能的消耗占总能源消耗的比例，可以衡量一个国家现代化水平的程度。电力工业的发展集中反映了国民经济的发展。生活用电量的增加，直接体现了人民生活水平的提高。电力工业是把一次能源转变成电能的生产行业。一次能源是指以原始状态存在于自然界中，不需要加工或转换过程就可能直接提供热、光或动力的能源，如石油、煤炭、天然气、水力、核能、风能、海洋能等。一次能源可以通过转换成为优质的二次能源——电能。

电能通过变电所、配电设备和高压输电线路，通过电力网络输送到用户。电能可以转化为光能、声能、热能、机械能和化学能等。以电能作为动力可以有效地提高各行各业的生产自动化水平，促进技术进步，提高劳动生产率和人民的物质文化生活水平。

按照所使用的一次能源划分，电力工业可以分为以煤、油和天然气为燃料的火力发电厂，以水能作为动力的水力发电厂，以原子核裂变释放出能量转变成电能的核电厂，把风能转变为电能的风电场，还有燃气—蒸汽联合循环发电厂、抽水蓄能电厂、太阳能发电厂、地热发电厂、潮汐能发电厂等。目前电力工业占主导地位的主要是火力发电、水力发电、风力发电和核电。

以煤、油和天然气为燃料的电厂称为火力发电厂，简称火电厂（见图 1-1），其中煤是我国火力发电厂最主要的燃料。我国电力生产能源结构是以煤为主，燃煤机组燃烧过程中排放的粉尘、灰渣和烟气会对环境产生不利影响。为了提高火力发电的经济性，现在的发展趋势是机组朝高参数、大容量方向发展。超临界 600MW 火力发电机组已经在我国得到迅速发展，1000MW 的超超临界机组也已经开始建设。火电厂是一个复杂的腐蚀环境，除了由于燃煤引起的严重钢结构大气腐蚀（包括厂房钢结构、锅炉岛钢结构、吊机、输煤栈桥和堆取料机等），还涉及到各类储罐内壁腐蚀、循环水管外壁和内壁、高温绝热部位、烟囱内外壁的腐蚀，以及腐蚀环境最为恶劣的烟气脱硫 FGD（Fuel Gas Desulphurization）系统。

以水能作为动力发电的电厂叫水力发电厂，又称为水电站。其生产过程是由拦河坝维持的高水位的水，经压力水管进入水轮机推动转子旋转，将水能转化成机械能，水轮机带动发电机旋转，从而使机械能变为电能。在水轮机中做完功后的水经尾水管排入下游。除了大坝蓄水外，还有抽水蓄能电站，它将电力系统负荷处于低谷时的多余电能转换为



图 1-1 建设中的火力发电厂

水的势能。水能是可再生能源，水力发电是清洁的电力生产，不排放有害气体和灰渣，没有核辐射污染。

全世界包括中国，利用风能进行发电，目前正处于大力发展期。风能是可再生能源，风是地球上的一种自然现象，风能利用形成主要是将大气运动时所具有的动能转化为其他形式的能。相比火电、水电和核电等，建设形式相对简单，电力生产清洁无污染。

核技术的和平利用主要是进行电力生产。目前全世界有 400 多座核电站，发展核电是许多国家解决能源供应和保障能源安全的重要手段。核能的技术优点明显，一是能量密集，功率高；二是能量储存比太阳能和风能等其他新能源容易，比煤炭和重油、天然气等也要更为方便储存；三是核能比较清洁，不会产生二氧化硫、二氧化碳和氮氧化物等气体。

电力的生产与供应同时完成，是一种无储存的商品，所以要求安全第一，防止电力设备的腐蚀，确保电力设备的安全、经济运行，不能由于失效故障而影响电力的供应。防腐蚀涂料的涂装在很大程度上，有力地保障了电力设施的安全运行。

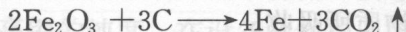
第二节 腐蚀的基本原理

一、腐蚀的概念

腐蚀是材料和周围环境介质发生作用而被破坏的现象。金属材料的腐蚀就是金属与周围介质发生化学、电化学作用或物理溶解而产生的破坏。

金属在自然界，大多数都是以化合物（稳定态）存在。按热力学的规律，金属从矿石中冶炼而来，需要消耗大量的能量来提炼（冶金过程），这就是说金属中储存了相当大的能量，大多数金属都具有自发地与周围介质发生作用又转成氧化态的倾向。

例如钢铁的腐蚀就是因为热力学性质的不稳定性。铁是赤铁矿 (Fe_2O_3) 由焦炭中的碳在高炉中还原得到的, 这一过程可以用简单的化学反应式表示如下:



(铁矿石) (碳) (铁) (气体)

该反应是在极高的温度下发生的, 在此过程中需要大量的能量, 生成的最终产物铁是不稳定的。当铁暴露于潮湿及有氧环境下时, 铁将趋向于回到原来的化合物稳定态, 反应式如下:



(铁)

(铁锈)

铁锈是铁氧化物的水合物, 其成分类似于赤铁矿, 因此可以解释在大多数情况下钢铁为何容易生锈。

二、金属电化学腐蚀基本原理

金属材料腐蚀实质上是腐蚀电池反应的结果。要了解电化学腐蚀的过程, 首先要了解腐蚀电池的组成和工作原理。

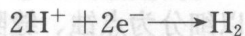
铜—锌腐蚀电池 (见图 1-2) 是一个简单的腐蚀原电池。把大小相等的 Zn 片和 Cu 片同时置于稀硫酸溶液中, 并用导线通过毫安表将二者连接起来。

当合上开关时, 毫安表上指针立即偏转, 表明有电流通过。以锌为阳极, 铜为阴极构成腐蚀原电池。可以发现锌片不断溶解, 但是表面没有气泡析出, 表明锌阳极失去电子, 电子流向铜阴极; 铜片溶解, 但是表面有大量气泡析出, 说明锌失去的电子与铜表面上溶液中的氢离子结合, 形成氢原子, 并聚合成氢气逸出。在腐蚀学里, 规定电位较低的电极 (氧化反应发生的地方) 为阳极, 电位较高的电极 (还原反应发生的地方) 为阴极。因此, 原电池将发生如下反应:

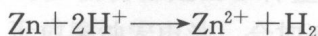
阳极反应:



阴极反应:



总反应:



产生电子的反应叫氧化反应, 消耗电子的反应叫还原反应, 因此上述总的反应又称之为氧化还原反应。

腐蚀原电池实质上是一个短路电池, 即电子回路短接, 电流不对外做有用功, 且只能导致金属材料的破坏。一个腐蚀电池必须包括阳极、阴极、电解质溶液和外电路四个部分, 缺一不可。由这四个部分组成的腐蚀电池工作的三个必要环节如下:

(1) 阳极过程。金属进行阳极溶解, 以金属离子或水化离子形式转入溶液, 同时将等量

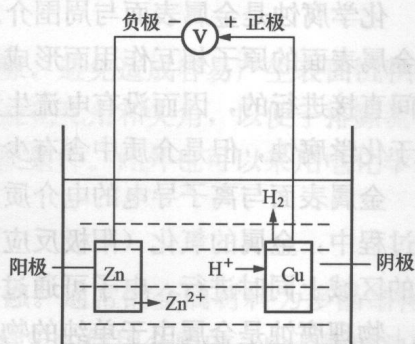


图 1-2 铜—锌腐蚀电池示意图

的电子留在金属上。

(2) 阴极过程。从阳极通过外电路流过来的电子被来自电解质溶液且吸附于阴极表面能够接受电子的物质,即氧化性物质所吸收。

(3) 电流的流动。电流的流动在金属中是依靠电子从阳极经导线流向阴极,在电解质溶液中则是依靠离子迁移。

上述腐蚀原电池是为了便于理解腐蚀电池的组成和工作原理而人为设计的,外电路是人为连接的导线。在实际工作环境中,腐蚀电池的外电路通常就是被腐蚀金属的基体。这种差别并不会改变腐蚀电池发生的过程。如果将锌片和铜片互相直接接触后浸入无氧稀硫酸溶液中,将发生与铜—锌腐蚀电池同样的变化。

第三节 腐蚀的基本类型

一、腐蚀的类型

金属的腐蚀按腐蚀过程的特点,可以分为化学腐蚀、电化学腐蚀和物理腐蚀三类。

化学腐蚀是金属表面与周围介质直接发生纯化学作用而引起的破坏。特点是氧化剂直接与金属表面的原子相互作用而形成腐蚀产物。在腐蚀过程中,电子的传递是在金属与氧化剂之间直接进行的,因而没有电流生产。单纯的化学腐蚀实例较少,金属在有机介质中的腐蚀属于化学腐蚀,但是介质中含有少量水即会转变成电化学腐蚀。

金属表面与离子导电的电介质发生电化学作用而产生的破坏叫电化学腐蚀。在电化学腐蚀过程中,金属的氧化(阳极反应)和氧化剂的还原(阴极反应)在被腐蚀的金属表面上不同的区域上同时进行,电子可通过金属基体从阳极区流向阴极区,从而产生电流。

物理腐蚀是金属由于单纯的物理作用而发生的破坏。

按腐蚀本身显示的形态分类是腐蚀分类的常用方法。由腐蚀形态可以分为全面腐蚀和局部腐蚀。

全面腐蚀是在整个金属表面上进行的腐蚀,即整个金属表面几乎以相同速度进行腐蚀,最后使金属变薄直到失效。全面腐蚀是重要的腐蚀类型,会造成金属的大量损失,但是这类腐蚀并不可怕,一般不会造成突然事故,腐蚀速度低且容易测定。

在腐蚀环境下,金属表面某些区域发生的腐蚀称局部腐蚀。其特点是阳极区和阴极区一般可以截然分开,腐蚀电池中的阳极反应和还原反应可以在不同部位发生,而次生腐蚀产物又可在第三地点形成。局部腐蚀又可以细分为点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、电偶腐蚀、选择性腐蚀、应力腐蚀破裂、微生物腐蚀、腐蚀疲劳、冲刷腐蚀和空泡腐蚀等。

二、点蚀

点蚀,又称孔蚀,是在金属表面产生小孔的一种局部性腐蚀形态,在绝大多数情况下是相对较小的孔眼。从表面上看,点蚀互相隔离或靠得很近,看上去呈粗糙表面。点蚀是大多数内部腐蚀形态的一种,点蚀的危害性非常大,经常突然导致事故的发生,是破坏性和隐患较大的局部腐蚀形态之一。

点蚀经常发生在自钝化的金属或合金表面,并且在含有氯离子的介质中更易发生。比如不锈钢、铝和铝合金多在海水中发生点蚀。

防止点蚀的发生,主要是选用高铬含量或同时含有大量钼、氮、硅等合金元素的耐海水腐蚀的不锈钢。要选用高纯度的不锈钢,因为钢中含硫、碳等极少,提高了耐蚀性能。碳钢要防止点蚀发生,方法也是提高钢的纯度。在设备的制造、运输和安装过程中,要保护好材料表面,不要划破底材或擦伤表面膜。

三、缝隙腐蚀

缝隙腐蚀一般发生在处于腐蚀液体中的金属表面或其他屏蔽部位,是一种严重的局部腐蚀。经常发生于金属表面的缝隙中。它通常和处于金属孔隙、密封垫片表面,以及在螺丝和铆钉下的缝隙内的少量停滞溶液有关。但并不是一定要有缝隙才可以发生这种腐蚀,它也可能因为在金属表面上所覆盖的泥沙、灰尘、脏物等而发生。几乎所有的腐蚀性介质,包括淡水都能引起金属的缝隙腐蚀,而含氯离子的溶液通常是最敏感的介质。

形成氧浓差电池是缝隙腐蚀的开始。由于滞留影响,氧只能以扩散的方式向缝隙内传递,缝隙内的氧消耗后难以得到补充,而缝隙外的氧随时可以得到补充,缝隙内外就形成了氧浓差电池,缝隙内是阳极。由于电池有着大阴极/小阳极的面积比,腐蚀电流较大,缝隙外是阴极。二次腐蚀产物又在缝隙口形成而逐步发展成闭塞电池,使得自催化过程发生,缝隙内金属的溶解过程加速进行。

为了防止缝隙腐蚀,主要是在结构设计中避免形成缝隙,避免造成容易产生表面沉积的条件。因此,焊接比铆接或螺栓连接要好。容器设计上要避免死角和尖角,以便于排除流动液体。垫片要采用非吸湿性材料,以免吸水后造成腐蚀介质条件。此外也可以采用电化学保护的方法来防止,方法是外加电流。

四、晶间腐蚀

沿着或紧挨着金属的晶粒边界发生的腐蚀称为晶间腐蚀。通常的金属材料为多晶结构,因此存在着晶界,晶界物理化学状态与晶粒本身不同,在特定的使用介质中,由于微电池的作用而引起局部破坏。这种局部破坏从表面开始,沿晶间向内发展,直至整个金属由于晶界破坏而完全丧失强度。这是一种危害很大的局部腐蚀。

不锈钢发生晶间腐蚀的机理主要是贫铬。奥氏体不锈钢经焊接后,使用过程中焊缝附近易发生腐蚀,通常是在母材板上离焊缝有一定距离的一条带上。这是因为这条带上经受了敏化加热的缘故。

高强度铝合金在工业大气、海洋大气及海水中也会发生晶间腐蚀,主要是在晶界上析出 CuAl_2 或 Mg_2Al_3 而引起贫 Cu 或贫 Mg 区而引起的。

五、电偶腐蚀

电偶腐蚀也称为双金属腐蚀。许多设备都是由多种金属组合而成的,如铝与铜、铁与锌、铜与铁等。在电解质水膜下,形成腐蚀宏电池,会加速成其中负电位金属的腐蚀。影响电偶腐蚀的因素有环境、介质导电性和阴阳极的面积比等。在潮湿大气中也会发生电偶腐蚀,湿度越大或大气中盐分越大种类越多(如靠近海边),则电偶腐蚀速度越快。大阴极小阳极组成的电偶,阳极腐蚀电流密度越大,腐蚀越严重。

电偶腐蚀首先取决于异种金属之间的电位差。这里的电位指的是两种金属分别在电解质溶液(腐蚀介质)中的实际电位,即该金属在溶液中的腐蚀电位,这与标准电极要区分开来。常用金属与合金在海水中的电偶序排列见表 1-1。

表 1-1 常用金属与合金在海水中的电偶序排列

金属和合金	E (V)	腐 蚀 性
铂 (Platinum)	+4.0	↑ 贵金属，不易腐蚀 阴极 阳极 ↓ 贱金属，易腐蚀
碳 (Carbon)/石墨 (Graphite)	+(0.02~0.3)	
钛 (Titanium)	+(0.15~0.2)	
不锈钢 (Cr18Ni9 Stainless steel)	+0.17	
α 黄铜 (Brass, 30%Zn)	-0.11	
铜 (Copper)	-0.08	
碳钢 (Carbon steel)	-0.40	
铝 (Aluminium)	-0.53	
锌 (Zinc)	-0.80	
铝合金 (Aluminium anode alloy, 10%Zn)	-0.70	
镁 (Magnesium)	-1.45	

从表 1-1 可以看出，从镁开始，靠下位置的金属，越是活泼，性质越不稳定，易被腐蚀，称为贱金属，通常充当阳极。当两耦合的金属位置距离越远时，表示其电位差值越大，作为阳极的金属（电位较负）的腐蚀程度将显著增加。

在电偶腐蚀电池中，阴极和阳极面积之比对腐蚀过程有着面积效应的影响。不同金属耦合的结构，在不同的电极面积比下，对阳极的腐蚀速度影响也不一样。大阳极/小阴极结构中，由于阳极面积大，阳极溶解速度相对减小，不至于在短期内引起连接结构的破坏，因而相对地较为安全。大阴极/小阳极结构可以使阳极腐蚀电流急剧增加，连接结构很快受到破坏。

防止电偶腐蚀的方法有：

- (1) 尽量避免电位差悬殊的异种金属作导电接触。
- (2) 避免形成大阴极小阳极的不利面积比。面积小的部件宜用腐蚀电位较正的金属。
- (3) 电位差大的异种金属组装在一起时，中间一般要加绝缘片，垫片紧固不吸湿，避免形成缝隙腐蚀。
- (4) 设计时，选用容易更换的阳极部件，或将它加厚以延长寿命。
- (5) 可能时加入缓蚀剂或涂漆以减轻介质的腐蚀，或加上第三块金属进行阴极保护等。

其中，在涂层涂覆时，必须把涂料涂覆在阴极性金属上，这样可以显著减小阴极面积。如果只涂覆在阳极性金属上，由于涂层会有孔隙，必然会产生严重的大阴极/小阳极组合。

六、选择性腐蚀

选择性腐蚀也称脱成分腐蚀，通常是多元合金中某一较为活泼的成分溶解到腐蚀介质中去，从而另一成分在合金表面富集。比如，黄铜的脱锌（表面呈红色或棕色），铜镍合金的脱镍，铝青铜的脱铝等。

实际工作中最常见的是黄铜的脱锌，脱锌的形式有三种：均匀的层状脱锌、带状脱锌和栓状脱锌。脱锌会使黄铜强度降低，导致穿孔。黄铜中含锌量越高，脱锌倾向越大。黄铜中

含铋、铁、锰都能促使脱锌加速。黄铜脱锌腐蚀是热力发电机组凝汽器上黄铜管较为常见的腐蚀形式。

七、应力腐蚀破裂

由于外加或本身残余的应力，加之环境腐蚀性介质的作用，导致金属的早期破裂现象，叫应力腐蚀破裂，通常以 SCC (Stress-Crossion-Crack) 表示。

金属应力腐蚀破裂只在对应力腐蚀敏感的合金上发生，纯金属极少产生。合金的化学成分、金相组织、热处理对合金的应力腐蚀破裂有很大影响。处于应力状态下，包括残余应力、组织应力、焊接应力或工作应力在内，可以引起应力腐蚀破裂。对于一定的合金来说，只有在特定的环境中才会发生应力腐蚀破裂。例如不锈钢在海水中（见图 1-3），铜合金在氨水中，碳钢在硝酸溶液中。

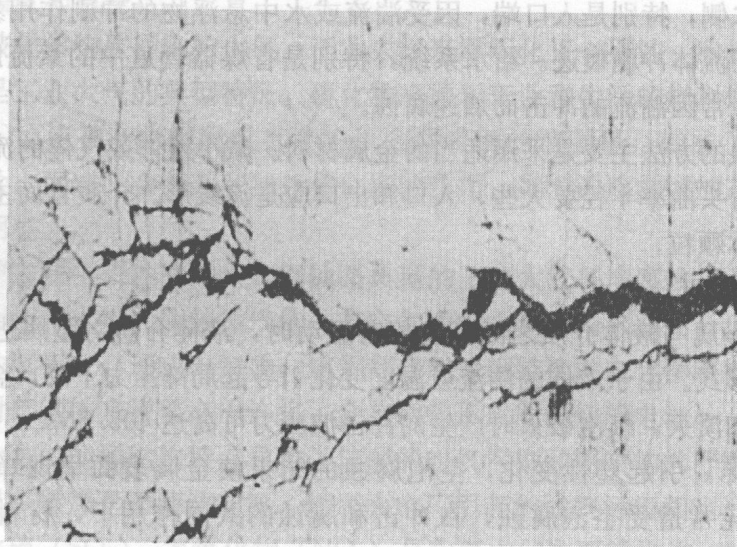


图 1-3 不锈钢的应力腐蚀破裂

防止应力腐蚀破裂的主要方法是：

- (1) 消除一切应力或施以压应力，设备加工或焊接后最好进行除应力退火处理，或进行喷砂处理造成表面压应力以减降低应力腐蚀破裂的敏感性。
- (2) 改变介质的腐蚀性，使其完全不腐蚀（添加缓蚀剂），或者使其转为全面腐蚀，均可防止应力腐蚀破裂。
- (3) 选用耐应力腐蚀破裂的金属材料，使其不能构成材料/环境组合。
- (4) 采用保护性覆盖层，如电镀层或涂料非金属涂层等。
- (5) 采用阴极保护。

八、腐蚀疲劳

材料或构件在交变应力和腐蚀环境下引起的脆性断裂称为腐蚀疲劳。腐蚀疲劳多起源于表面腐蚀坑或表面缺陷，腐蚀裂纹多是穿晶型，也会出现沿晶或混合型裂纹，并随裂纹发展而变宽。腐蚀疲劳断裂属脆性断裂，断口有疲劳特征，又有腐蚀特征。

按腐蚀介质来分，腐蚀疲劳可以分为气相腐蚀疲劳和液相腐蚀疲劳。气相腐蚀疲劳多为化学腐蚀，液相腐蚀疲劳多为电化学腐蚀。腐蚀疲劳的机理通常要将疲劳机理与电化学腐蚀作

用结合起来考虑。

九、冲刷腐蚀

由于液体的高速流动或液体及气体中的粒状物作用而产生，在金属表面上呈槽形、波浪态、圆形孔状或峡谷状，没有腐蚀产物的遗留。这种损伤比冲刷或腐蚀单独存在时所造成的损伤加在一起还要厉害得多。这是因为冲刷与腐蚀相互促进的缘故。这种腐蚀多见于有流体的管道内。泵叶的损坏也是常见的冲刷腐蚀。

冲刷腐蚀主要是由于较高的流速引起的，而当溶液中还含有研磨作用的固体颗粒时，如不溶性盐类、砂粒和泥浆等，就更容易产生。破坏的作用是不不断去除金属表面起保护作用的钝化膜，而且也会不断带来阴极反应物（如溶解氧），从而减小阴极极化，加速腐蚀。

在凝汽器管水侧，特别是入口端，因受湍流或水中悬浮物的冲刷作用易发生冲刷腐蚀，腐蚀部位有明显的流体冲刷痕迹。给水系统，特别是省煤器管道中的紊流区，如管道弯头、三通、变径等处，常因湍流的冲击而加速腐蚀。

防止冲刷腐蚀的方法主要是采用适当的金属材料。减小液体或气体的流速，并且管系的直径前后一致，弯头曲率半径要大些，入口和出口应是流线形。介质方面主要是用过滤和沉淀的方法除去固体颗粒。

十、空泡腐蚀

空泡腐蚀是金属与液体介质之间高速相对运动时，液体介质对金属进行的冲击和腐蚀反应的一种腐蚀形式。由于液体的湍流或温度变化引起局部压力下降，金属表面附近的液体中有气泡产生和溃灭，气泡破灭时产生的冲击波压力可高达 405.3MPa (4000atm)，使金属表面保护膜破坏，引起塑性变化，空泡腐蚀的结果使金属表面呈现蜂窝状腐蚀坑。高速运转的水泵叶轮常遭受空泡腐蚀，在冲击和腐蚀的共同作用下，材料表面就会形成蜂窝状蚀坑。

十一、微生物腐蚀

微生物腐蚀是指在微生物的存在与生命活动参与下所发生的腐蚀过程，也称为细菌腐蚀。细菌参与金属腐蚀，最初是在地下管道中发现的，随后逐渐发现矿井、水井、海港、循环冷却水系统中的金属构件和设备的腐蚀都和细菌有关。

第四节 腐蚀环境的分类

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、淡水和海水的腐蚀、土壤腐蚀、高温腐蚀以及其他一些特殊的介质浸泡腐蚀等。

一、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不同的。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、氧气和腐蚀性介质（包括雨水的杂质）、表面沉积物等的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下金属表面发生氧化、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电化学反应。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。比如海洋大气中的海盐粒子,工业大气中的二氧化硫,甚至尘埃等。空气中的这些杂质溶于金属表面液膜中时,这层液膜就变成了腐蚀性电解质,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。

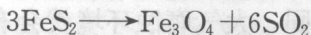
乡村大气中不含有强烈的化学污染物质,但含有有机物和无机物尘埃。空气的主要成分是水分及氧气、二氧化碳等通常组分,大气腐蚀相对较弱。影响腐蚀的因素主要是大气环境中的相对湿度、温度和温差。

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。

我国的燃煤为主的能源结构特点导致了较多的空气污染和钢结构的严重腐蚀,特别是造成酸雨污染的情况。燃煤是不清洁能源,燃煤火电厂引起的大气污染相当严重,属煤烟型污染,粉尘、二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)是大气中的主要污染物。

煤炭、燃油等化石燃料燃烧过程中排放出的 SO_2 , 对自然环境、人类健康、工农业生产、建筑物和材料等,都造成了一定程度的危害。可燃烧硫及其他化合物如硫铁矿等,在高温下与氧发生反应,生成 SO_2 , 其反应式如下:



空气中的 SO_2 对人体健康的影响主要是通过呼吸道系统进入人体,与呼吸器官作用,引起或加重呼吸器官的疾病。 SO_2 被飘尘吸附后对人体的危害更大,吸附 SO_2 的飘尘可以将 SO_2 带入人的肺部,毒性会成倍增加。在光照的作用下,飘尘中的 Fe_2O_3 等物质可将 SO_2 催化转化成 SO_3 , 遇水形成硫酸雾,被飘尘吸附后,如果吸入肺部滞留在肺壁,可引起肺纤维性病变和肺气肿。硫酸雾的刺激作用比 SO_2 高 10 倍。

SO_2 对植物的危害是通过叶面气孔进入植物体,在细胞或细胞液中生成 SO_3^{2-} 或 HSO_3^- 和 H^+ , 其浓度和持续时间超过本身的自解机能,就会破坏植物正常的生理机能,影响其正常生长,严重时会造成植物枯死。

SO_2 带来最严重的问题是酸雨,大气中的 SO_2 、 NO_x 与氧化性物质 O_3 、 H_2O_2 和其他自由基进行化学反应生成硫酸和硝酸,最终形成 pH 值低于 5.6 的酸雨。酸雨的形成过程十分

复杂，可以简化为如图 1-4 所示的过程。

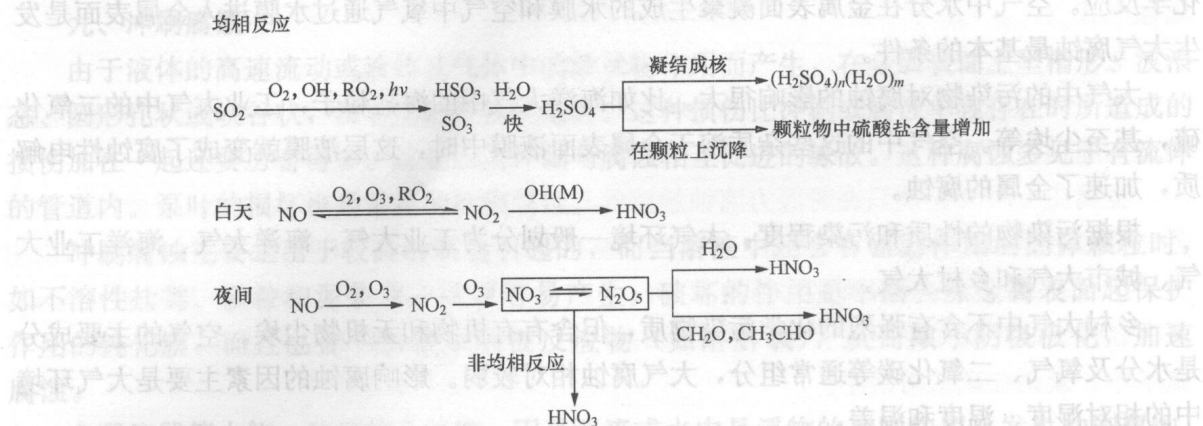


图 1-4 酸雨的形成过程

酸雨对环境的危害巨大，它会使土壤酸化和贫瘠化，农作物和植被的生长减缓，湖水酸化，对建筑物和材料造成酸性腐蚀，加速风化过程。

海洋性大气环境的相对湿度大，大气中含有海盐粒子。当海盐粒子沉降在金属表面上，或者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，也会因其而产生点蚀。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，相关的分类标准有 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》以及国际标准 ISO 12944-2:1998《色漆和清漆 钢结构防腐涂层的腐蚀保护 第 2 部分：环境分类》。

随着大气环境中腐蚀性因子的浓度变化，大气腐蚀环境就会不同，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的区别。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~ISO 9226 系列标准，对大气腐蚀进行两种方法的分类（ISO 9223），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），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）。ISO 9224 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 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 1-2）。该分类标准与 ISO 12944 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。国家标准 GB/T 19292.1—2003 等同于采用国际标准 ISO 9223。