

.....

材料腐蚀

与

防护技术

李宇春 龚洵洁 周科朝 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

材料腐蚀与防护技术

李宇春 龚洵洁 周科朝 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书由作者在材料腐蚀与防护技术方面多年的研究成果汇集编写而成。

本书共分7章。分别为腐蚀基础及研究内容，电力、冶金工业中的材料及生产特点，热力设备的腐蚀和防护，大型锅炉的停用保护新方法研究，冷却水系统中新型防腐缓蚀剂的研究，新型抗塔盐腐蚀电极材料的研究及应用。

本书可供电力、冶金及相关专业（金属、材料、化学、化工、热动等）的大学生、研究生、科研技术人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

材料腐蚀与防护技术/李宇春, 龚洵洁, 周科朝著.
北京: 中国电力出版社, 2004

ISBN 7-5083-2321-1

I. 材… II. ①李…②龚…③周… III. ①工程材料-腐蚀②工程材料-防蚀 IV. TB304

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 044854 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>)

利森达印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2004年9月第一版 2004年9月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 12.25印张 272千字
印数 0001—3000册 定价 20.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)



前 言

本书总结了作者硕士、博士、博士后及工作期间的研究成果和收获，内容涉及火力发电厂的设备腐蚀、大型锅炉停炉保护缓蚀剂（十八胺系列）技术的研究、冷却水缓蚀剂（钼酸盐系列）的综合研究和评价、灰色系统及其建模评价应用、铝电解工业熔盐腐蚀的防护研究（重点从电解电极的材料设计、制备角度来研究）。

本书不仅介绍了材料腐蚀和防护的相关知识和研究成果，还从实践的角度，综合介绍电力、冶金工业的一些概况，对于不熟悉这两个行业的人士，会有个大致的了解，对于书中涉及的研究内容也有较全面的理解。另外，本书还介绍了灰色建模理论的概况，结合缓蚀剂评价、建模部分的成果，可使相关人员能迅速掌握灰色系统理论的应用方法。

最后，本书花了较大篇幅来探讨电化学测试系统应用研究及其在实际研究的分析情况，这些电化学分析也许不是完全准确、完善，只能代表一家之言，但是，就电化学测试系统的了解和研究应用来说，本书抛开纯理论的介绍，也没有对纯研究问题进行专业探讨，而是把纯理论知识和实际研究结合起来，不仅提供了研究方法和思路，更重要的是给出了系统的研究过程介绍。本书力求在这方面能够同纯理论书籍、纯专业书籍、纯技术实践书籍达到互补的效果，使科研人员能从本书中获得更多的信息量，也可以使相关人士能够对相关问题的较全面的了解。

本书是在作者导师黄伯云院士、龚洵洁教授、许崇武教授、周科朝教授的悉心指导与大力帮助下完成的，各位导师渊博的学识、严谨治学的态度和勤奋敬业、坚韧不拔的精神永远是作者学习的榜样。导师们在研究方案的组织与实施方面给予了作者不断的指导与支持，在此表示深深的感谢。本书的完成，还要特别感谢彭珂如、郑敏聪、范隆海、谢学军、朱志平、张芳、刘咏、周涛、刘芳、李志友、黄苏萍等同志的大力协助。本书的出版，受到了长沙电力学院学术著作出版基金的资助。

本书的读者对象为，电力、冶金及相关专业（金属、材料、化学、化工、冶金、热动专业等）的学生、科研人员、技术人员。

由于作者的学术水平有限，书中难免会存在一些缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

作 者

2004年3月



序

材料的腐蚀与防护日益成为人们关注的问题，因为材料腐蚀所造成的损失十分巨大，不仅造成国民经济的直接损失，而且还带来一系列的间接损失。

为了防止材料的腐蚀，广大腐蚀工作者一方面深入研究腐蚀的机理、影响因素，另一方面进一步研究防止腐蚀的措施，把腐蚀造成的损失降到最低程度。由于腐蚀是在材料与介质之间发生的复杂的化学或电化学反应，腐蚀所涉及的因素十分多，而且变化大。所以进行腐蚀研究比较困难，有时腐蚀现象的重现性比较差，更增加了研究工作的难度。随着现代科学技术的发展，特别是现代测试技术的进步，给腐蚀的研究增加了新的手段，提供了新的研究方法，大大促进了腐蚀研究工作的深入发展，腐蚀研究取得了一大批可喜的成果，防腐蚀技术有了新的提高。

电力工业是国民经济的重要组成部分，电力工业中的腐蚀和防护问题是一个十分重要的问题。无论是火力发电、水力发电，还是核能发电，其设备都可能发生腐蚀。有的部位腐蚀还十分严重，影响设备的安全、经济运行，特别是大容量高参数的发电设备，腐蚀问题更加突出。多年来，有关高等院校、电力试验研究部门、电力设计部门，电厂的科技工作者，对电力工业中的腐蚀问题进行了深入的系统研究，逐步掌握了腐蚀的机理、影响因素，提出了防止腐蚀的有效方法，保证了电力设备的安全经济运行。近年来，科技工作者针对电力工业中的腐蚀问题，努力应用现代科技成果开展研究，提出了一些新的防腐蚀措施，取得了满意的防腐蚀效果，进一步丰富了腐蚀理论和防护技术。

李宇春在攻读硕士学位、博士学位期间，在导师的指导下，对热力设备停用期间的防腐蚀技术和冷却水系统中新型缓蚀剂的应用进行了深入研究，取得了创新性的成果。本书比较集中地反映了李宇春在攻读硕士、博士学位时的研究成果，具有较高的理论价值；对于生产实际也具有重要的指导作用。李宇春在攻读博士后学位期间，结合冶金工业的实际，在导师的指导下，就新型抗熔盐腐蚀电极材料进行了认真研究，取得了重要的成果。本书也全面地反映了这方面的研究成果。

本书具有以下特点：

第一，紧密联系实际。书中所论述的问题都是生产实际中需要解决的问题。例如，大型热力机组的停用保护，采用传统的保护方法，虽然也有一定的保护效果，但不适用于检修期间的保护，或者保护操作方法比较繁琐，保护效果不佳，迫切需要采用新的保护方法，作者采用 12 系列缓蚀剂作为停用机组保护用缓蚀剂是一个很好的探索。

第二，广泛采用现代研究方法。作者在缓蚀剂的研究中，不仅采用传统的研究方法，而且应用新的研究方法，比如现代表面分析技术的应用，使缓蚀剂的研究没有停留在宏观水平上，而是进入到微观领域，并把宏观和微观研究有机地结合起来。又比如，把灰色理论应用于缓蚀剂研究，进一步拓宽了缓蚀剂的研究方法。

第三，反映新的研究成果。本书所涉及的领域，特别是大型热力机组的停用保护、冷却水系统中新型防腐缓蚀剂的应用、新型抗熔盐腐蚀电极材料等方面，作者的论述都突破了原有的结论，介绍了新的研究成果。

第四，简明扼要，重点突出。本书没有就材料腐蚀与防护的问题进行广泛论述，而是在介绍了腐蚀的基本理论和基本知识之后，重点论述作者仔细研究过的问题。这样，就使本书便于读者阅读，并使读者受到启发，得到帮助。

总之，本书的针对性较强，内容较新，论述问题较深入，所涉及的问题都具有实际意义。

当然，由于时间的关系，也由于某些条件的限制，有些问题的研究还有待深入，有些成果的应用还需要做进一步的工作。

材料腐蚀和防护这门科学技术需要得到社会更大关注，需要各级领导和科技工作者、广大工人和技术人员更加重视，需要更多的人力、财力和物力的投入，需要更多地引进现代科学研究方法，本书的出版，在这方面将起积极作用。

李沟洁

目 录

序

前言

第一章 腐蚀基础及研究内容	1
第一节 腐蚀基础	1
第二节 缓蚀剂概况	2
第二章 电力、冶金工业中的材料及生产特点	6
第一节 电力工业概况	6
第二节 火力发电设备	8
第三节 冶金工业概况	9
第三章 热力设备的腐蚀和防护	12
第一节 热力设备的材料及常见腐蚀形式	12
第二节 热力设备的氧腐蚀及防护	15
第三节 酸性腐蚀与防护	23
第四节 热力设备的应力腐蚀	27
第五节 锅炉的介质浓缩腐蚀	33
第六节 铜合金的腐蚀与防护	41
第七节 化学清洗	49
第八节 整体启动时的洗硅工艺	56
第四章 大型锅炉的停用保护新方法研究	58
第一节 概述	58
第二节 十八胺系列缓蚀剂防蚀机理	64
第三节 防腐蚀性实验分析	69
第四节 电化学实验分析	83
第五节 热分解实验	90
第六节 十八胺系列缓蚀剂的应用及测试分析	92
第七节 十八胺对阳树脂的污染与复苏研究	94
第五章 中性介质中新型防腐缓蚀剂的研究	100
第一节 中性介质中的缓蚀剂应用概况	100

第二节	电化学测试在中性介质缓蚀剂的研究及应用	105
第三节	中性介质缓蚀剂的灰色理论建模方法及主要研究内容	107
第四节	试验条件	109
第五节	极化曲线实验研究	112
第六节	交流阻抗实验研究	121
第七节	挂片实验研究	128
第八节	钼酸盐对碳钢在自来水中缓蚀机理的研究及其缓蚀模型的建立	131
第九节	钼酸盐系列缓蚀剂对紫铜在除盐水中缓蚀机理的研究	142
第六章	新型抗熔盐腐蚀电极材料的研究及应用	153
第一节	铝电解惰性电极研究概述	154
第二节	NiFe_2O_4 材料的性质及特点	159
第三节	陶瓷相材料 NiFe_2O_4 的制备及性能评价	160
第四节	$\text{Ni}-\text{Fe}-\text{X}$ 金属相材料的成型、烧结工艺及抗氧化研究	166
第五节	金属陶瓷材料的粉浆浇注成型工艺和烧结工艺研究	173
第六节	复合梯度材料的制备工艺研究	177
第七章	电力、冶金工业材料防腐研究总结	182
参考文献	184

第一章

腐蚀基础及研究内容

腐蚀学研究的泰斗艾文思 (U.R. Evans 1889~1980) 见到人们不重视腐蚀问题, 曾感慨地说: “腐蚀被认为是污秽的学科。”有人妙答道: “但是, 您却使它 (腐蚀科学) 成为高尚的。”

材料腐蚀时所发生的变化实际上是一种由不能稳定存在的纯物质向化合物形式的矿物态的“回归”。热力学的“熵增序减”第二定律无时无刻不在向人们诠释它的真理性, 虽然“耗散结构”理论解释了存在的“负熵”现象, 但是, 腐蚀体系基本上都不可能是耗散结构的。

第一节 腐蚀基础

一、腐蚀

“腐蚀”一词来自拉丁语“corrodere”, 意指“腐烂掉”。最常见的腐蚀形式是铁的生锈。同样过程也在其他金属, 甚至非金属材料如塑料、混凝土和陶瓷中出现。按定义来说, “腐蚀”代表一个过程, 它通过材料与其所处环境间的物理化学反应产生并导致材料性能的变化。其结果是某种“腐蚀效应”即腐蚀引起的腐蚀系统任何部分的变化 (国际标准 ISO-8044 定义), 它通常是有害的, 比如实用材料的腐蚀破坏、腐蚀产物对环境的污染、蒸汽动力设备系统的功能下降等。

当金属从高炉等冶炼炉中生产出来时, 它们便由矿物中的稳定态转为金属态, 后者在绝大多数实用条件下是不稳定的。因此, 对于绝大多数暴露在大气中的金属, 存在着一种推动力使它转变为类似存在于矿物中的稳定化合物。概括地说, 当金属腐蚀时所发生的变化是一种向矿物态的“回归”。铁的生锈便是实例, 在该过程中, 金属铁将变成 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的化合物, 如氧化物或氢氧化物 (铁锈)。这类化合物类似于诸如磁铁矿 (Fe_3O_4) 或褐铁矿 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) 的矿物。对于某一给定状态金属 (Me 、 Me_n^{+} 或 Me_2O_n), 它能否自发反应并转化为另一种状态, 其先决条件是发生反应并伴随能量释放。这时反应具有热力学推动力。若转化反应要求供给能量, 则意味着转化不能自发进行。换言之, 反应不具有热力学推动力, 这时金属处于热力学稳定状态。同水溶液接触的金属的稳定状态取决于溶液的氧化还原电位和 pH 值及体系温度等因素。

由于材料与环境反应而引起材料的破坏或变质称为腐蚀。腐蚀也可以认为是除了单纯机械破坏以外的材料的各种破坏。近年来又把腐蚀的定义扩大到材料与环境之间的有害反应。材料包括金属材料和非金属材料, 即包括各种金属与合金、陶瓷、塑料、橡胶和其他



非金属材料。

金属腐蚀可定义为：由于金属与环境反应而引起金属的破坏或变质，或除了单纯机械破坏以外金属的一切破坏，或金属与环境之间的有害反应。

金属腐蚀的过程是发生在金属与介质界面上的复杂多相反应，因此破坏总是从金属表面逐渐向内部深入。金属在发生腐蚀过程时，一般也同时发生外貌变化，如溃疡斑、小孔、表面有腐蚀产物或金属材料变薄等；金属的机械性能、组织结构也发生变化，如金属变脆、强度降低，金属中某种元素的含量发生变化或金属组织结构发生相变等。

二、金属腐蚀环境

金属腐蚀过程就是金属材料 and 环境的反应过程。环境一般指材料所处的介质、温度和压力等。

几乎所有的介质都有一定的腐蚀性。由于金属材料不同，介质的状态不同、成分不同、浓度不同，即使在温度、压力相同的条件下，腐蚀的程度也各不相同。空气、天然水、海水、蒸馏水和盐水都是有一定腐蚀性，水蒸气和其他气体，如氧气、氯气、氨气、硫化氢、二氧化硫和可燃气体，各种无机酸和有机酸，各种碱类，各种溶剂及各种油脂也都有腐蚀性。

一般温度和压力的升高会使腐蚀加剧。介质的流速也是影响腐蚀的重要因素。

三、金属腐蚀的分类

(1) 按腐蚀机理划分为电化学腐蚀和化学腐蚀。金属与介质发生电化学反应的腐蚀称电化学腐蚀；发生化学反应的腐蚀称为化学腐蚀。如锅炉在水侧的腐蚀属电化学腐蚀，在烟气侧温度在露点以上的腐蚀为化学腐蚀。

(2) 按腐蚀形态划分为均匀腐蚀和不均匀或局部腐蚀。金属表面几乎全面遭受腐蚀的称为均匀腐蚀；只有一部分遭受腐蚀的称为不均匀腐蚀或局部腐蚀。局部腐蚀又可分为小孔腐蚀、晶间腐蚀、缝隙腐蚀等。

(3) 按腐蚀的温度划分为低温腐蚀和高温腐蚀。

(4) 按腐蚀介质的状态划分为干腐蚀和湿腐蚀。

(5) 按介质的种类划分为大气腐蚀、土壤腐蚀和海水腐蚀。

各种金属腐蚀之间又有一定联系，如干腐蚀一般为化学腐蚀，湿腐蚀一般为电化学腐蚀。金属在高温下氧化引起的腐蚀属于化学腐蚀。

第二节 缓蚀剂概况

一、缓蚀剂

缓蚀剂是具有抑制金属腐蚀性的一类无机物与有机物的总称，具体分类参见图 1-1。有一些有机物能有效地吸附在金属表面上，从而明显地影响金属表面的电化学反应。这种

情况从作用机理上来说,分为抑制金属表面阳极反应和阴极反应两大类,相应的缓蚀剂分别称为阳极型缓蚀剂和阴极型缓蚀剂,它们作用的结果都是使金属表面腐蚀的反应速度降低。从某种程度上说,缓蚀剂的加入是为了增加整个腐蚀电池回路中电解质的电阻。实际上,电阻的增加是由于在金属表面形成了百万分之一英寸的薄膜引起的,如果选择性沉淀膜在阳极形成,则腐蚀电位向更正的方向移动;如果在阴极形成,则向更负的方向移动,最终都会导致腐蚀速度的降低。由图 1-2 可以明显地看出,加入缓蚀剂后,代表反应速度的腐蚀电流密度大幅度降低,有效地抑制了腐蚀,这就是缓蚀效果。



图 1-1 常用缓蚀剂分类

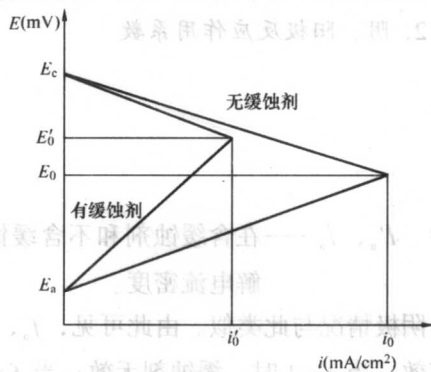


图 1-2 加入缓蚀剂前后的效果对比图

用缓蚀剂防腐蚀的历史悠久,从 1860 年英国人首次使用糖浆及植物油的混合物作为酸洗钢板的缓蚀剂后,它已经在机械、化工、轻工、石油、运输、冶金、电化学等许多领域取得了显著的经济效益。由于缓蚀剂的作用,在某些条件下可用普通钢材代替贵重钢材。因此,缓蚀剂在国民经济的各行业中被广泛应用。美国、俄罗斯、日本和西欧等国,十分重视缓蚀剂在工业部门中的应用,并且制订了一系列缓蚀剂使用的标准,在工业中应用十分普及。20 世纪 50 年代初,我国由于使用了天津若丁酸洗缓蚀剂,钢材酸洗质量大大提高,节约了大量钢材和硫酸,并使操作工人的劳动条件得到了改善。近年来,我国应用缓蚀剂的工业部门愈来愈多,包括电力工业、化学工业、石油工业、冶金工业、机械工业等,石油工业使用 7701 复合酸化缓蚀剂后,每年不仅可节约大批钢材和设备费用,更重要的是保证了酸化工艺的实现,对油井增产稳产有重大意义。

二、缓蚀性能指标

一般用下面三个指标反映缓蚀剂的作用效果:缓蚀效率 (η)、电极反应作用系数、腐蚀电位的变化量。

1. 缓蚀效率

$$\eta = \frac{I_0 - I'_0}{I_0} \quad (1-1)$$

式中 I_0, I'_0 ——未加缓蚀剂和加了缓蚀剂时的腐蚀电流密度。

对于任何一种缓蚀剂,总存在一个浓度范围。在这个范围内,缓蚀效率随浓度的变化



而单调变化, 超过这个范围时, 缓蚀效率可能就不变或者逆向变动。不过, 在实际测量缓蚀效率时, 多数用的是失重法, 这种方法比较经典, 也比较可靠。其计算公式如下

$$\eta = \frac{w - w'}{w} \quad (1-2)$$

式中 w ——在未加缓蚀剂的空白溶液中的失重;

w' ——加有缓蚀剂溶液中同样面积大小试样的失重。

在实际的腐蚀过程中, 由于腐蚀速度测定方法的不同, 所以按照式 (1-1) 和式 (1-2) 计算出来的结果并不完全一致, 只能用做相对比较。

2. 阴、阳极反应作用系数

$$f_a = \frac{I'_a}{I_a}$$

$$f_c = \frac{I'_c}{I_c} \quad (1-3)$$

式中 I'_a, I_a ——在含缓蚀剂和不含缓蚀剂的溶液中, 金属电极在同一电位下的阳极溶解电流密度。

阴极情况与此类似。由此可见, f_a, f_c 都是电极电位的函数, 并且当 $f < 1$ 时, 缓蚀剂有效; 当 $f = 1$ 时, 缓蚀剂无效; 当 $f > 1$ 时, 缓蚀剂加速腐蚀反应。

3. 添加缓蚀剂前后腐蚀电位的变化量

$$\Delta E = E'_{\text{corr}} - E_{\text{corr}} \quad (1-4)$$

式中 $E'_{\text{corr}}, E_{\text{corr}}$ ——加缓蚀剂和未加缓蚀剂时溶液的腐蚀电位。

如果在空白溶液中腐蚀过程的阳、阴极的反应速度都遵循塔菲尔关系, 并且对数塔菲尔斜率分别用 b_a, b_c 来表示, 则有

$$\Delta E = \frac{b_a b_c}{b_a + b_c} \lg\left(\frac{f_c}{f_a}\right) E'_{\text{corr}} \quad (1-5)$$

利用式 (1-5), 可以根据缓蚀剂对腐蚀的阳、阴极反应过程的影响情况, 将缓蚀剂分成阳极型缓蚀剂、阴极型缓蚀剂和混合型缓蚀剂等三类。当 $\Delta E \approx 0$ 时, 即 $f_c = f_a$, 为混合型缓蚀剂; 当 $\Delta E > 0$ 时, E'_{corr} 朝正向移动, 为阳极型缓蚀剂; 当 $\Delta E < 0$ 时, E'_{corr} 朝负向移动, 为阴极型缓蚀剂。

三、缓蚀作用的影响因素

由于缓蚀剂具有相对适用性, 所以发挥效果就受到很多因素的限制, 包括温度、浓度、流速、材料、溶液成分等。同一种缓蚀剂, 对不同型号的钢材的缓蚀性能有明显的差别。比如, 钢材的型号和种类不同, 缓蚀剂所达到的效果就有很大的区别, 即便是碳钢, 由于其含碳量不同, 腐蚀速率也不同。比如在盐酸中, 一般是含碳高的钢材腐蚀速度较高。

影响缓蚀剂缓蚀效果的因素很多, 除了缓蚀剂的性质、金属的种类和表面状态诸因素外, 还与缓蚀剂的浓度、使用温度、介质的性质和缓蚀剂组分等因素有关。

1. 浓度的影响

缓蚀剂浓度对金属腐蚀速度的影响大致有三种情况：

(1) 金属的腐蚀速度随缓蚀剂浓度的增加而降低。如碳钢在常温、20%硫酸中，就属于这种情况。实际上很多有机及无机缓蚀剂在酸性及浓度不大的中性介质中，都属于这种情况。

(2) 缓蚀剂浓度和金属腐蚀速度的关系有极限值。如硫代二乙二醇在 5mol/L 盐酸中的情况就是如此。因此在使用这一类缓蚀剂时，必须注意缓蚀剂不要过量。

(3) 缓蚀剂用量不足会加速金属腐蚀。如为减缓淡水和盐水腐蚀常用的缓蚀剂（亚硝酸钠）就属于这类缓蚀剂，在盐水中亚硝酸钠添加量不足时，碳钢的腐蚀速度不仅加大，而且还会有发生明显点蚀的危险。大部分氧化剂属于这类缓蚀剂，如铬酸盐、重铬酸盐、过氧化氢等。

2. 温度

金属的腐蚀速度一般随温度升高而加快，尤其是在腐蚀过程有氢气析出的介质中，如钢在酸中的溶解就是如此。然而，有机胺类（属于吸附型缓蚀剂）缓蚀剂与金属表面发生的化学吸附作用会随温度的升高而得到增强，生成一层保护物质，从而降低腐蚀速度。这一类缓蚀剂通常是高效缓蚀剂，它的加入不仅使腐蚀速度减小，同时还使腐蚀反应的温度系数减小。

此外，温度对缓蚀率的影响，有时还与缓蚀剂的水解因素有关。例如介质温度升高，会促进磷酸钠的水解，从而使其缓蚀率随温度升高而降低。另外，由于介质中氧的溶解量随温度升高而明显降低，因此那些需由氧参与形成钝化膜的缓蚀剂，缓蚀率是随温度升高而降低的。

3. pH 值

对于有机胺类缓蚀剂来说，pH 值的大小对整个缓蚀效果有着非常重要的影响。在某一个 pH 值范围内，效果会比较理想；一旦 pH 值超出这个范围，就会引起缓蚀效果的明显变化，甚至起不到缓蚀作用。对于不同的环境和不同的介质，对 pH 值的要求就有可能不同。比如，火力发电厂凝结水回水管的防蚀与锅炉停炉保养所需要的 pH 值就不同。

4. 复配成分

复配剂在缓蚀剂体系中有着非常重要的协调与协同作用，虽然其含量很少，但效果比较明显。比如表面活性剂的存在，就能够显著降低水的表面张力。所以在一定的条件下，表面活性剂能够在溶液/固体界面上定向排列，其定向不仅取决于液体与固体的极性，还取决于表面活性剂是否与固体起化学作用。除了能定向排列之外，表面活性剂还能够改变界面张力，使固体颗粒有加溶作用，某些活性剂使固体乳化并促使其在溶液中分散。从而能促进缓蚀剂的缓蚀效果。

第三章

电力、冶金工业中的材料及生产特点

“天下莫柔弱于水，而攻坚强者莫之能胜。以其无以易之。弱之胜强，柔之胜刚，天下莫不知，莫能行。”——老子。

金属铝的得到何其困难，而地壳中铝含量居第三位，遍地都是铝的化合物，自然界的规律告诉我们，要得到自己需要的材料，付出的代价何等昂贵；而且，自然界还是“吝啬”的，我们得到的很多纯金属，都会自然而然地腐蚀，向其原始的化合物形式的矿物态“回归”。腐蚀研究工作者的任务就是“战胜”或“改变”这既成事实。

第一节 电力工业概况

能源工业是人类不可缺少的重要资源，对人类的物资文明与社会发展起着巨大的作用。能源有一次能源与二次能源之分。一次能源（煤、石油、天然气）来自大自然界，是大自然界本身就有的。二次能源是经过人们加工的能量，它比一次能源的商品价值高，更利于使用。电力是最主要的二次能源，石油炼制品，如汽油、柴油、石油液化气、发生炉煤汽与焦炭等都是二次能源。

我国的能源资源丰富，在燃料能源中以煤为主，已探明的储量超过 7800 亿 t。我国煤炭热值高，灰分与硫分等杂质含量低，绝大多数为优质原煤。我国的煤炭储量还可以用几百年。所以，在很长一段时间内火力发电将是我国的主要电力来源。电力工业是能源工业的重要组成部分，电力工业的发展能集中反映国民经济的发展，生活用电量的增加能直接体现人民生活水平的提高。

电能是来源于燃料化学能或水的位能的二次能源，具有其他能源无可比拟的优点。电能可以通过由变电所、配电设备、高压输电线路、配电线路等组成的电力网络输送到各个用户。同固体燃料或液体燃料相比，它不受交通运输的限制，在瞬间内可以实现长距离传输。电能可以转化为光能、声能、热能、机械能等，满足照明、通信、加热、制冷、切削、焊接、驱动机器、牵引机车等的需要。

我国有电的历史已经超过一百年，但是其发展速度还较慢，已经成为制约国民经济发展的瓶颈。为了尽可能地满足各行各业对电力的需求，既要根据国民经济发展的需要与综合平衡加快电力建设，还要确保现有的发电设备安全无事故的运行，其中的一个重要方面是确保发电设备不因腐蚀故障而意外停止运行。下面介绍一些水、水汽的常见问题。



一、水在火力发电厂中的作用

水在火力发电厂的生产过程中，既是热力系统的工作介质，又是某些热力设备的冷却介质。当火力发电机组运行时，几乎所有的热力设备中都有水或蒸汽在流动，水质的优劣是影响发电厂安全经济运行的重要因素。水处理工作的主要任务，就是改善水质或采取其他措施，以消除由于水质不良而引起的危害。

二、现代高参数电厂中的水质问题

火力发电厂中锅炉机组的参数愈高，其热能利用率也就愈高，发电的经济性也愈好。在高参数电厂中水处理问题尤为重要，这与现代机组的特点有关。这些特点为：

- (1) 为了节省金属消耗量，力求达到最大的蒸汽生产率，锅炉的局部热负荷较过去的设计为高。
- (2) 高温、高压汽轮机中采用的合金材质，在经热处理提高强度后，对蒸汽纯度很敏感，极易引起腐蚀龟裂。
- (3) 各种盐类在蒸汽中的溶解度，随着蒸汽参数的提高而有所增大。

三、汽水品质不合格的危害性

在火力发电厂中，如汽水品质不符合规定，则可能引起以下危害。

1. 热力设备的结垢

如果进入锅炉的水中有易于沉积的杂质，则在其运行过程中会发生结垢现象。垢的导热性为金属的 $1/100 \sim 1/10$ ，而且它又极易在热负荷很高的部位生成，所以垢对锅炉的危害性很大。它可使金属壁温过高，引起金属强度下降，以致使锅炉的管道发生局部变形、鼓包，甚至爆管。而且，垢还会降低锅炉的传热效率，从而影响电厂的经济效益。

对于高参数的大型锅炉，给水中的硬度已被全部去除，故形成的主要是氧化铁垢。在汽轮机凝汽器内，因冷却水水质问题而结垢会导致凝汽器真空度下降、汽轮机的热效率和出力降低。

2. 热力设备的腐蚀

火力发电厂中的热力设备会因水质不良而引起腐蚀问题，如给水管道、各种加热器、锅炉的省煤器、水冷壁、过热器和汽轮机凝汽器等。

高参数热力设备的腐蚀，是因为有一种或几种因素的存在，如碱性或酸性介质的形成，有将杂质含量从 $\mu\text{g/L}$ 级或 mg/L 级浓缩至百分数级的过程，有对腐蚀敏感的材料，有拉应力。

腐蚀不仅会缩短设备本身的服役期，而且由于金属腐蚀产物转入水中，成为炉管上新的腐蚀源，同时使给水中杂质增多，促进炉管内的结垢过程，结成的垢转而又加剧炉管的腐蚀，形成恶性循环。如果金属的腐蚀产物被蒸汽带到汽轮机中，则会因它们沉积下来而严重地影响汽轮机的安全和运行的经济性。

3. 过热器和汽轮机内积盐

水质问题还会引起锅炉产生的蒸汽不纯，而使蒸汽带出的杂质沉积在蒸汽的通流部



位，如过热器和汽轮机，从而产生积盐现象。

过热器管内积盐会引起金属管壁温度过高，以致爆管。汽轮机内积盐会大大降低汽轮机的出力和效率。当汽轮机内积盐严重时，还会使推力轴承负荷增大，隔板弯曲，降低汽轮机工作效率或造成事故停机。

第二节 火力发电设备

我国的发电设备中，火力发电设备占 71.8%，其发电量占 80%。这是因为火力发电厂的建设费用低，建设周期短，可以根据资源情况灵活地布置于负荷中心或能源基地。

除了单一生产电力的火力发电厂之外，还有供应热力和电力的热电厂，热电厂把做过部分功的蒸汽作为工业用汽热源供应用户，也可以通过热力管网供应 70~110℃ 的采暖与生活用热水，实现城市集中供热，不论从减少环境污染，还是从节约能源方面考虑，都是必要的。

目前，一般主力机组的装机容量为 300MW，典型的配置包括：锅炉采用亚临界自然循环燃煤汽包炉（型号如 DG1025/18.2—II 19），汽轮机采用一次中间再热、双缸双排汽凝汽式汽轮机（型号如 N300—16.7/537/537），发电机采用水—氢—氢冷发电机。

一、火力发电厂主要设备及其参数

火力发电厂的主要设备主要包括锅炉、汽轮机和发电机三大件，还包括再热器、过热器、凝汽器、高低压加热器和除氧器等主要辅助设备。根据锅炉压力的不同，可以将火电机组分为七个等级，即低压、中压、次高压、高压、超高压、亚临界和超临界压力机组，各压力级别机组的蒸汽参数及容量见表 2-1。

表 2-1 常见锅炉机组参数、容量及用途

锅炉压力级别		低压	中压	次高压	高压	超高压	亚临界	超临界
锅炉型式		火管锅炉 水管锅炉 热水锅炉	自然循环 锅炉	自然循环 锅炉	自然循环、 少数为 直流锅炉	自然循环、 少数强迫 循环、直 流锅炉	自然循环、 强迫循环 直流锅炉	直流锅炉
饱和 蒸汽	压力 (MPa)	≤2.35	3.9	7.84	9.8~10.8	15.7	17.6	≥25.0
	温度 (℃)	≤225	250	294	310~316	343	355	374.2
过热 蒸汽	压力 (MPa)	≤2.2	3.5	7.4	9.0	13.7	16.5	≥23.0
	温度 (℃)	350	450	480	510~540	510~540	530~550	530~550
蒸发量 (t/h)		≤35	65~130	120~250	220~430	410~670	850~2050	1050~3000
发电机组 (MW)		6	12~25	25~50	50~100	125~200	250~600	300~1000

二、火电机组的水汽及其流程

在火力发电厂中，锅炉、汽轮机及附属设备组成了热力系统，热力系统中的各种热交

换部件或水汽流经的设备，如锅炉的省煤器、水冷壁管、过热器、汽轮机、各种加热器、除氧器和凝汽器等，统称为热力设备。水和蒸汽是热力设备中的工作介质，在热力系统中循环运行。

水汽在热力系统循环过程中，总不免会有些损失，这些工作介质的损失是由于热力系统某些设备的排汽放水，管道阀门的漏汽漏水，水箱等设备的溢流或热水蒸发等原因造成的。为了维持热力系统正常水汽循环，要及时补充工作介质的损失。用来补充热力系统水汽损失的水叫做补给水。送进锅炉的水称为给水，给水一般由凝结水、补给水、疏水组成。

整个水汽流程示意图如图 2-1 所示。首先使用经过专门净化过的水在锅炉中受热，产生蒸汽，将具有巨大潜能的蒸汽送入汽轮机，使汽轮机以 3000r/min 的转速带动发电机旋转产生电力。做过功的蒸汽在凝汽器中凝结为水重复使用，所损失的部分蒸汽和水由净化水设备定时制水补充。

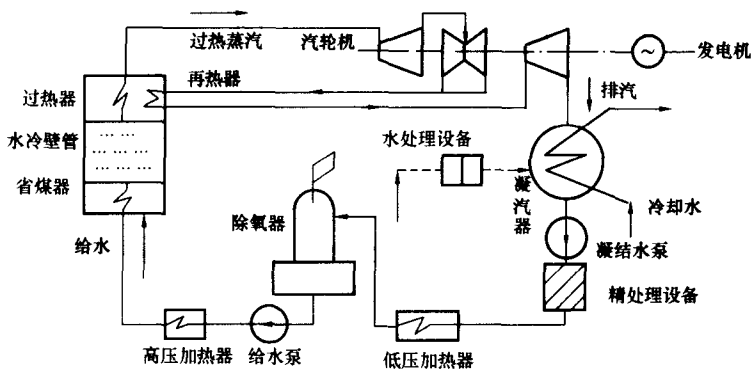


图 2-1 凝汽式发电厂水汽系统流程

在火力发电厂的水汽循环系统中，供给锅炉的水是经过除氧器脱氧后，经给水泵升压，再经高压加热器加热，通过省煤器送给锅炉。给水在锅炉中受热生成蒸汽，蒸汽经过过热器提高温度后送往汽轮机，由汽轮机排出负压的低温蒸汽（约 45℃）在凝汽器中凝结为水，同时在凝汽器中补充一定的除盐水。混合后的水经过凝结水泵送出，再经低压加热器加热后，送给除氧器脱氧，即是循环后的锅炉给水。

在火力发电厂中，易于发生腐蚀的设备是与水或蒸汽接触的锅炉、给水管路、热交换器、凝汽器和汽轮机。这些设备因其中的介质都具有很高的温度和压力，故常被称作热力设备。热力设备的腐蚀程度与其参数及设备的材质有关。

第三节 冶金工业概况

冶金是研究从矿石或其他含金属原料中提取金属的一门科学。冶金工业通常分为黑色冶金工业和有色冶金工业。前者包括生铁、钢和铁合金（如铬铁、锰铁等）的生产；后者包括其余所有各种金属的生产。

作为冶金原料的矿石（或精矿），其中除含有所要提取的金属矿物外，还含有伴生金