

热力发电厂水处理 上册

修 订 本

武汉水利电力学院电厂化学教研室编

水利电力出版社

PDG

前 言

能源是发展国民经济的重要物质基础。为了适应工农业生产需要和节约燃料，我国热力发电厂今后仍将向高参数大容量的汽轮发电机机组发展。为了保证这些机组的安全经济运行，对电厂水处理将有更为严格的技术要求。因此，提高电厂化学水处理工作人员的业务水平，也就成为当务之急。

我们教研室编写的《热力发电厂水处理》（上、下册），自1976年出版以来，受到了广大读者的欢迎，这对我们是一个极大的鼓舞。在这次修订中，我们除勘正了原书中的一些错误外，还删除了烦琐的内容，增添了近年来水处理工作中发展起来的新技术，以满足读者的需要。

本书修订本仍分上下两册，上册主要讲述水的净化，下册主要讲述热力发电厂机炉系统内的水处理。修订中，力求内容简明易懂，切合实际；阐述原理，尽量说明其物理与化学的性能，避免繁复的公式推导；关于常用的水处理方法、系统、设备和数据，以及某些实践经验，都作了必要的介绍，以供读者参考。

本书内容的选材和安排，以我国现实情况为主，适当选用了一些对我国有一定参考价值的国外资料。

本书第一版由我室施燮钧、肖作善、王蒙聚和杨炳坤同志编写，施燮钧同志统编。这次修订本的修改工作具体分工如下：上册第五、六两章和第四章部分内容由王蒙聚同志修订，其余各章由施燮钧同志修订，并由施燮钧同志统编；下册第十五章由施燮钧同志修订，第十六章由王蒙聚同志修订，其余各章由肖作善同志修订，并由肖作善同志统编。

本书在修订过程中，中南电力设计院黄锦松同志和吉林电力试验研究所赵连璞同志以及我室陈绍炎同志和钱达中同志等对一

些章节提出了可贵的意见，对此表示衷心感谢。

由于我们水平有限，书中一定还有错漏和欠妥之处，诚恳希望读者批评指正。

武汉水利电力学院电厂化学教研室

1983年6月

目 录

前 言

绪 论	1
第一节 水在热力发电厂中的作用	1
第二节 热力发电厂中水处理的重要性	4
第一章 水质概述	7
第一节 常用化学名词概述	7
一、溶液(7) 二、浓度(9) 三、质量作用定律和化学平衡(13) 四、电离(15) 五、水的电离, pH值(16) 六、溶度积(18) 七、活度(20)	
第二节 天然水中的杂质	22
一、悬浮物(22) 二、胶体(23) 三、溶解物质(23)	
第三节 水质指标	27
一、悬浮物(27) 二、溶解盐类(29) 三、硬度(30) 四、碱度和酸度(32) 五、有机物和耗氧量(33)	
第四节 天然水中几种主要化合物	34
一、碳酸化合物(34) 二、硅酸化合物(37) 三、铁的化合物(39) 四、氮的化合物(40)	
第五节 天然水的特点	40
一、按主要水质指标分类(42) 二、按水处理工艺学分类(42)	
第二章 水的沉淀处理	45
第一节 水的混凝处理	45
一、胶体化学基础(45) 二、混凝原理(49) 三、影响混凝效果的因素(52) 四、混凝剂和混凝辅助剂(57)	
第二节 水的沉淀软化	62
一、沉淀软化原理(62) 二、石灰处理(63) 三、其它沉淀软化处理(73)	
第三节 水的镁剂沉淀除硅	74
一、镁剂沉淀除硅原理(74) 二、影响镁剂沉淀除硅效果的因素(74)	

第四节 沉淀处理设备	76
一、沉淀池(76) 二、澄清池(79)	
第五节 沉淀处理系统和加药设备	103
一、沉淀处理系统(103) 二、加药设备(104)	
第三章 水的过滤处理	111
第一节 水的过滤过程	111
一、过滤原理(111) 二、过滤过程中的水头损失(112)	
三、滤料(114) 四、影响过滤的因素(117) 五、滤池 的维护(122)	
第二节 压力式过滤器	124
一、普通过滤器(124) 二、双流式过滤器(127) 三、多层 滤料过滤器(128)	
第三节 滤池	130
一、无阀滤池(130) 二、单阀滤池(136) 三、虹吸滤池 (137)	
第四节 混凝过滤	139
一、直阻混凝过滤(140) 二、接触混凝过滤(140) 三、高 速双流过滤(141) 四、微絮凝过滤和变孔径过滤(142)	
第五节 吸附过滤	142
一、吸附原理(143) 二、活性炭(144)	
第四章 离子交换的基本知识	146
第一节 离子交换剂的结构	148
一、磺化煤(148) 二、离子交换树脂(149)	
第二节 离子交换原理	154
第三节 离子交换树脂的性能	156
一、物理性能(156) 二、化学性能(160)	
第四节 离子交换平衡	163
一、平衡常数(163) 二、选择性系数(164) 三、平衡计算 (165) 四、选择性顺序(167)	
第五节 离子交换速度	168
第五章 水的阳离子交换处理	173
第一节 固定床离子交换的原理	174
一、水中含有 Ca^{2+} 时和 Na 离子交换剂的交换(174) 二、水中 含有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^{+} 时和 H 离子交换剂的交换(176)	

第二节 离子交换的软化和除碱系统	173
一、软化(178) 二、软化和除碱(181)	
第三节 固定床离子交换	189
一、顺流式(189) 二、逆流再生式(199) 三、分流再生式(206)	
四、浮动床式(207)	
第四节 连续床离子交换	212
一、移动床(212) 二、流动床(216)	
第五节 离子交换的辅助设备	217
一、喷射器输送系统(217) 二、泵输送系统(218)	
第六章 水的离子交换除盐	219
第一节 阴离子交换树脂的工艺特性	219
一、强碱性阴树脂的工艺特性(219) 二、弱碱性阴树脂的工艺特性(232)	
第二节 一级复床除盐	234
一、原理(234) 二、运行(235) 三、监督(238)	
第三节 混合床除盐	240
一、原理(240) 二、固定床式混合床(242)	
第四节 各种离子交换除盐系统	250
一、主系统(250) 二、再生系统(254)	
第五节 提高离子交换除盐经济性的措施	257
一、碱液加热(258) 二、增设弱酸、弱碱性离子交换器和采用双层床交换器(258)	
三、采用对流式和设置前置式交换器(261)	
四、提高淡化高含盐水的经济性措施(262)	
五、回收废再生液和清洗水及其处理(265)	
第六节 新离子交换树脂的处理和贮存	270
一、新树脂的处理(270) 二、树脂的贮存(271) 三、树脂的鉴别和分离(272)	
第七节 设备的防腐	274
一、橡胶衬里(275) 二、环氧树脂涂料(275) 三、玻璃钢(276)	
四、聚氯乙烯塑料(277) 五、工程塑料(277)	
六、不锈钢(279)	
第七章 水的其它除盐方法	281
第一节 蒸馏	281
一、蒸发器的结构(281) 二、蒸发器出力与其级数的关系(283)	

三、蒸发器的水质和经济性(284)	
第二节 扩容蒸发	285
一、扩容蒸发器的特点(285)	
二、扩容蒸发器的结构(287)	
三、扩容蒸发器的水质和经济性(288)	
第三节 电渗析	290
一、电渗析原理(290)	
二、离子交换膜(293)	
三、电极材料(296)	
四、电渗析器的结构(297)	
五、电渗析器的技术性能(300)	
六、电渗析器运行中的几个问题(302)	
第四节 反渗透	308
一、反渗透原理(308)	
二、半透膜(309)	
三、反渗透水处理装置(311)	
四、应用反渗透器的注意事项(314)	
第八章 凝结水的净化	317
第一节 凝结水的污染	317
一、凝汽器的漏水(317)	
二、沾染金属腐蚀产物(319)	
三、热电厂返回水夹杂杂质(319)	
第二节 凝结水的过滤	320
一、覆盖过滤器(321)	
二、磁力过滤器(326)	
三、微孔过滤(331)	
第三节 凝结水除盐	332
一、H-OH型混合床(332)	
二、 $\text{NH}_4\text{-OH}$ 型和H-OH型混合床的比较(333)	
三、混合床再生中的一些问题(335)	
四、三床式系统(339)	
第四节 凝结水的除油和除盐	340
一、树脂床层的清洗(341)	
二、阳混合床系统(341)	
三、离子交换树脂粉覆盖过滤器(342)	
第五节 凝结水净化系统	344
附录	
附录 I 水分析结果的审核	346
一、阳离子和阴离子的含量(346)	
二、蒸发残渣(346)	
三、灼烧残渣和有机物(348)	
四、碱度(349)	
五、硬度(350)	
六、pH值(350)	
附录 II 离子交换树脂的性能试验	355
一、样品的预处理(356)	
二、全交换容量的测定(357)	
三、密度的测定(358)	
四、酸碱性的测定(359)	

附录III 水处理中常用的国产离子交换树脂的主要性能·····	363
附录IV 国产离子交换器的尺寸·····	370
附录V 常用药剂的性能·····	371
附录VI 常用元素的原子量和当量·····	374
附录VII 某些难溶物质的溶度积和溶解度·····	375
附录VIII 常用溶液的密度·····	376
一、硫酸溶液的密度(20°C)(376) 二、盐酸溶液的密度(20°C)	
(377) 三、氢氧化钠溶液的密度(20°C)(377) 四、氯化钠	
溶液的密度(20°C)(378) 五、石灰乳的密度(20°C)(378)	
六、氨水的密度(20°C)(379) 七、其它一些盐类水溶液的密度	
(克/厘米 ³)(380)	
附录IX 有关单位的换算·····	381
一、硬度单位的换算(381) 二、重量单位的换算(381)	
三、体积、容积单位的换算(382) 四、压力单位的换算	
(382) 五、流量单位的换算(383) 六、速度单位的换	
算(383) 七、筛目表(383)	
附录X 常用符号字母表·····	384
一、汉语拼音字母(384) 二、拉丁字母(384) 三、希腊字	
母(385)	

目 录

第九章 给水系统金属的腐蚀及其防止	387
第一节 金属的电化学腐蚀	387
一、电化学腐蚀概论(388) 二、影响电化学腐蚀的因素(395)	
三、防止金属电化学腐蚀的方法(399)	
第二节 给水系统金属的腐蚀	400
一、溶解氧腐蚀(400) 二、游离二氧化碳的腐蚀(404)	
三、同时有溶解氧和游离二氧化碳的腐蚀(406)	
第三节 给水系统金属腐蚀的防止	408
一、给水除氧(409) 二、给水 pH 值的调节(426) 三、调	
节给水水质的其它方法(434)	
第十章 汽包锅炉水汽系统的腐蚀、结垢及其防止	438
第一节 水汽系统的腐蚀及其防止	438
一、氧腐蚀(439) 二、沉积物下腐蚀(440) 三、水蒸汽腐	
蚀(446) 四、应力腐蚀(447)	
第二节 水垢和水渣	452
一、水垢的特性(452) 二、水渣的特性(455)	
第三节 水垢的形成及其防止	456
一、钙、镁水垢(456) 二、硅酸盐水垢(459) 三、氧化铁	
垢(460) 四、磷酸盐铁垢(463) 五、铜垢(465)	
第四节 易溶盐“隐藏”现象	467
一、发生的原因(467) 二、危害(470) 三、防止的方	
法(471)	
第五节 锅炉水的磷酸盐处理	471
一、磷酸盐防垢处理(472) 二、协调 pH-磷酸盐处理(479)	
第六节 锅炉钢管检查结垢、腐蚀状况的方法	483
一、割取管样的方法(483) 二、检查管样上沉积物量的方	
法(484)	
第十一章 汽包锅炉的蒸汽污染、积盐及其防止	486

第一节 蒸汽的污染	486
一、饱和蒸汽污染的原因(487)	
二、影响蒸汽带水的因素(488)	
三、饱和蒸汽溶解携带的基本规律(494)	
第二节 蒸汽流程中的盐类沉积物	499
一、过热器内的盐类沉积物(500)	
二、汽轮机内的盐类沉积物(503)	
三、过热器和汽轮机内盐类沉积物的清除(508)	
第三节 获得清洁蒸汽的方法	511
一、减少进入锅炉水中的杂质量(511)	
二、锅炉排污(512)	
三、汽包内部装置(517)	
四、调整锅炉的运行工况(528)	
第十二章 汽包锅炉的水、汽质量监督	530
第一节 水、汽质量标准	530
一、蒸汽(530)	
二、锅炉水(532)	
三、给水(533)	
四、给水的各组成部分(536)	
第二节 水、汽的取样方法	537
一、水的取样(538)	
二、蒸汽的取样(540)	
第三节 水、汽质量劣化时的处理	545
第四节 汽包锅炉的热化学试验	549
一、热化学试验的目的(549)	
二、热化学试验的准备工作(550)	
三、热化学试验的方法(553)	
四、热化学试验结果的整理(558)	
第五节 凝汽器漏水率的测定方法	559
第十三章 直流锅炉的水质	561
第一节 直流锅炉水、汽系统概述	561
一、工作原理(561)	
二、结构特点(562)	
三、水质的重要性(566)	
第二节 直流锅炉对给水水质的要求	567
一、杂质在过热蒸汽中的溶解度(567)	
二、杂质在直流锅炉内的沉积特性(570)	
三、杂质在直流锅炉中的沉积部位(577)	
四、影响杂质沉积过程的因素(578)	
五、直流锅炉的给水水质标准(580)	
第三节 直流锅炉水处理的特点	584
一、水质处理(584)	
二、水汽系统的清洗(586)	
第四节 直流锅炉启动时的水洗	587
一、冷态清洗(587)	
二、热态清洗(589)	

第五节 直流锅炉的热化学试验	590
一、目的(590) 二、准备工作(590) 三、试验方法(592)	
第十四章 锅炉的化学清洗和停用保护	594
第一节 锅炉的化学清洗	594
一、新建锅炉化学清洗的必要性(594) 二、运行锅炉化学清洗期的决定(595)	
三、化学清洗的范围(597) 四、化学清洗所用的药品(598)	
五、化学清洗方案的制定(606) 六、化学清洗的准备工作(617)	
七、化学清洗的步骤(619) 八、化学清洗后的处置(628)	
第二节 锅炉的停用保护	629
一、停用保护的必要性(629) 二、停用保护的方法(631)	
三、选择停用保护方法的原则(638)	
第十五章 冷却水处理	639
第一节 冷却水通道中有机附着物的形成及其防止	640
一、有机附着物的形成(640) 二、有机附着物的防止(641)	
第二节 凝汽器铜管内结垢及其防止	648
一、铜管内结垢(649) 二、水垢的防止(653)	
第三节 凝汽器铜管内生成附着物的判断	669
一、生成附着物的象征(669) 二、由水质来判断结垢(670)	
第四节 凝汽器铜管的清洗	674
一、海绵球自动清洗(675) 二、化学清洗(677)	
第五节 凝汽器铜管冷却水侧的腐蚀及其防止	680
一、腐蚀形式(681) 二、铜管材料及其选择(685) 三、腐蚀的防止(687)	
第十六章 水处理系统设计	693
第一节 水处理方案的选择	693
一、原始资料(693) 二、锅炉补给水水质(694) 三、水处理方案选择(697)	
第二节 水处理系统的工艺计算	699
一、出力(699) 二、离子交换设备(700) 三、除碳器(703)	
四、酸碱系统(708) 五、各种水箱(709) 六、水流阻力(710)	
第三节 水处理系统工艺计算例题	715
一、原始资料(715) 二、水处理系统的选择(732)	

附 录

附录XI 各类汽包锅炉的蒸汽携带系数和允许水质	733
-------------------------------	-----

- 一、中压锅炉(733) 二、高压锅炉(736) 三、超高压和亚
临界压锅炉(739)

附录XII 真空除气器和水力喷射器的计算	741
----------------------------	-----

- 真空除气器的计算(741) 二、水力喷射器的计算(746)

第九章 给水系统金属的腐蚀 及其防止

锅炉给水系统，是指给水和给水的主要组成部分，如汽轮机凝结水、加热器疏水的输送管道和加热设备，其中包括凝结水泵、低压加热器、除氧器、给水泵、省煤器和疏水箱等。

在给水系统中流动着的水，一般是比较纯洁的，在这里通常不会因盐类从水中析出而在管壁上形成沉积物，可能发生的故障是金属的腐蚀。

给水系统中各种设备和管道大都是由碳钢制成的，只有加热器中用来传热的管件通常是由黄铜制成，所以本章讨论的是给水系统中碳钢和黄铜的腐蚀。

给水系统的腐蚀，会影响锅炉及热力系统的安全和经济运行。比如省煤器因腐蚀而穿孔和给水泵叶轮的腐蚀损伤等，都会造成事故停炉；发生在金属表面的均匀腐蚀，虽不致立即使运行发生故障，但会使热力设备提前报废，缩短其使用年限。而且给水系统的腐蚀产物若被带入锅炉，还会污染炉水，引起锅炉内部的结垢和腐蚀，影响锅炉的安全运行。由于给水系统金属腐蚀的危害性很大，所以防止此系统的金属腐蚀是一项重要的工作。

第一节 金属的电化学腐蚀

金属表面和其周围介质发生化学或电化学作用，而遭到破坏的现象称为腐蚀，例如铁器生锈和铜器长铜绿就是铁和铜的腐蚀现象。金属腐蚀，按其本质的不同可分为化学腐蚀和电化学腐蚀两类。在电化学腐蚀过程中有电流产生，金属处于潮湿的地方或者遇到水时，特别容易发生这一类腐蚀；在化学腐蚀过程中没有

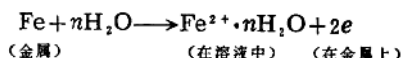
电流产生，而是金属表面和其周围的介质直接进行化学反应，使金属遭到破坏的现象。

在给水系统中发生的腐蚀都属于电化学腐蚀，所以这里介绍有关电化学腐蚀的知识。

一、电化学腐蚀概论

1. 电极电位

金属具有独特的结构型式，它的晶格可以看成是由许多整齐地排列着的金属正离子和在各正离子之间游动着的电子所组成。假使把一种金属浸入水溶液中，则在水分子的作用下它的正离子会和水分子形成水化离子，从而转入溶液中。现以金属铁为例，将其转化过程简单表示如下



其结果有若干金属离子转入溶液中，并且有等电量的电子留在金属表面上。发生了这种过程后，金属表面带有负电，水溶液则带正电。这样，在金属表面和此表面相接的溶液之间形成了双电层，如图9-1(a)所示。

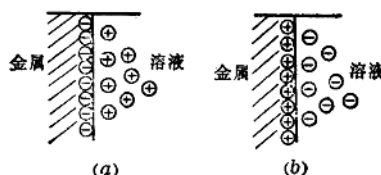


图 9-1 双电层的示意

(a) 金属带负电荷；(b) 金属带正电荷

当金属放在它的盐溶液中时，金属也可以从溶液中吸附一部分该金属正离子，而在它的表面部分形成了带正电和溶液带负电的双电层，如图9-1(b)。

双电层的正负电荷之间存在着吸引力，所以转入溶液中的水

化离子不会远离金属表面。而且，转入溶液中离子的量通常也极其微小，因为留在金属上的电子又会吸引溶液中的水化离子到金属表面上去，这个过程和前一个过程传递电荷的方向相反，如果这两个过程进行的速度相等，就会建立起平衡，这样离子转入溶液过程就会自动抑制了。由于金属表面和溶液间存在着双电层，所以有电位差，这种电位差称为该金属在此溶液中的电极电位。

金属电极电位的高低与溶液中该金属离子的浓度（正确地说是活度）和温度等有关。这个关系可用能斯特公式来表示。如（9-1）式

$$\varphi = \varphi^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln c \quad \text{伏} \quad (9-1)$$

式中 φ —— 金属的电极电位，伏；
 φ° —— 金属的标准电极电位，伏；
 R —— 气体常数（等于8.314），焦耳/K·摩尔；
 T —— 绝对温度，K^②；
 n —— 金属离子的价数；
 F —— 法拉第常数（等于96500），库仑/摩尔；
 c —— 金属离子的浓度（活度），摩尔/升。

这个公式说明，当温度恒定时，金属的电极电位随溶液中此金属离子浓度对数值的增大而增大，它们成线性关系。

当溶液中金属离子的浓度（活度）等于1摩尔/升时，公式（9-1）中的最后一项变为零，此时的电极电位与标准电极电位相等。因此，某金属的标准电极电位就是把它浸在含有该金属离子浓度（活度）等于1摩尔/升的溶液中的电极电位。对于一定的电极反应来说，在一定的温度下标准电极电位是一个定值，表9-1所示的是一些常用到的标准电极电位。

2. 气体电极

某些贵金属（如金、铂等）的化学性能很稳定，当把这类金

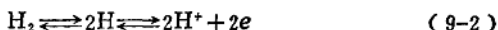
② 绝对温度K的数值等于273加上摄氏温度值。

表 9-1

25°C 时标准电极电位

电极名称	反 应	φ° (伏)
钾	$K \rightleftharpoons K^+ + e$	-2.925
钙	$Ca \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2e$	-2.87
钠	$Na \rightleftharpoons Na^+ + e$	-2.714
镁	$Mg \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2e$	-2.37
锌	$Zn \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2e$	-0.763
铁	$Fe \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2e$	-0.440
氢	$H_2 \rightleftharpoons 2H^+ + 2e$	0
铜	$Cu \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2e$	+0.337
氧	$4OH^- \rightleftharpoons O_2 + 2H_2O + 4e$	+0.401
氯	$2Cl^- \rightleftharpoons Cl_2 + 2e$	+1.3595

属浸入不含有自己阳离子的溶液中时，不能建立起表示这种金属的电极电位。但是这些金属的表面能够吸附一些分子、原子或离子，如果被吸附的物质是气体，而且这种气体能进行氧化还原过程，那么就有可能建立起一个表征此气体的电极电位，这种电极称为气体电极。例如，我们把铂电极浸入酸溶液中，并不断地通入氢气使铂表面上吸附着氢气，于是在金属表面与溶液界面上会建立起如(9-2)式所示的平衡式



这一平衡的电位称为氢电极电位。

在溶液中有氢离子和氢分子同时存在时，除铂以外很多物质的表面都可形成氢电极。

除了氢电极外，氧气和氯气等也能在一些金属表面上形成气体电极，即氧电极和氯电极等。

电极电位是相对的，我们只能测定两个电极的电位差，现在还没有办法测定单个电极的绝对电位。所以为了便于比较，人们规定在25°C时氢的标准电极电位为零，表9-1中所列的氢电极 φ° (伏)为0就是这个意思。

3. 平衡电位和非平衡电位

当某金属与溶液中该金属离子建立起如下的平衡时

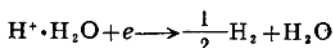


这个电极就产生一稳定的电极电位，该电位称为平衡电位或可逆电位，这种电极称为可逆电极。由实验测得的平衡电位值与由能斯特公式计算出的基本上相等。

假如在浸有金属的溶液中，除了有这种金属的离子外还有别的离子或原子，也参加电极过程，那么就有可能产生下述情况：在电极上失去电子是靠某一过程，而获得电子则靠另一过程，例如



和



这样，在电极上得失电子的两种过程是不可逆的，这种电极称为不可逆电极。不可逆电极所表现出来的电位叫做非平衡电位或不可逆电位。非平衡电位不服从能斯特公式，金属的非平衡电位的数值与金属的表面状态、溶液的组分、浓度、流速等都有关系，它只能用实验测定。研究金属腐蚀问题时，非平衡电位有重要意义。

4. 原电池和腐蚀电池

如前所述，当金属在溶液中形成双电层后，就会阻止金属的继续溶解，但如将金属上的电子引出，则金属的溶解过程又将继续进行。例如，将锌片与铜片浸入一电解质溶液中，当达到平衡后，锌、铜和溶液界面间都分别建立起双电层。但由于这两种金属转入溶液中的能力不一，在锌片上聚集的电子量比铜片上多，所以当用导线将两者联接时（如图9-2），就会发现电流通过。此时，锌片上的电子通过导线流向铜片，原有双电层的平衡就被破坏了，锌片上的锌离子将继续转入溶液。这个过程可以一直进行到锌片全部溶解为止。这是一种化学能转变为电能的装置，称为原电池。

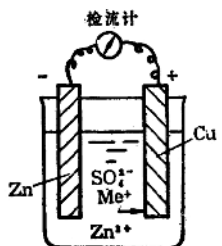


图 9-2 锌铜原电池