



全国电力高职高专“十二五”规划教材
电力技术类（动力工程）专业系列教材

中国电力教育协会审定

电厂水处理设备 运行与维护

全国电力职业教育教材编审委员会 组编

黄成群 李艳萍 主编

行动导向式



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



全国电力高职高专“十二五”规划教材
电力技术类（动力工程）专业系列教材

中国电力教育协会审定

电厂水处理设备 运行与维护

全国电力职业教育教材编审委员会 组 编

黄成群 李艳萍 主 编

王 颂 张中华 马 克 梅其政 副主编

洪锦从 宋丽莎 主 审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为全国电力高职高专“十二五”规划教材，电力技术类（动力工程）专业系列教材。

本书系统地介绍火电厂水处理设备工艺原理、设备结构、设备运行与维护。内容包括：认识锅炉补给水处理，运行与维护澄清池、滤池、超滤装置、反渗透装置、逆流再生离子交换器、混合离子交换器和电除盐装置；认识热力系统水处理，运行与维护凝结水精处理设备、给水全挥发和加氧处理设备、炉水处理设备；认识电厂其他水处理，包括循环冷却水处理、发电机内冷水处理、废水处理，锅炉化学清洗、热力设备停用保护，水汽集中取样分析装置。

本书可作为高职高专电力技术类（动力工程）专业电厂水处理课程的教材，也可作为企业岗位培训、职业资格鉴定的培训教材，还可作为电力、化工、石油、冶金和纺织等单位从事电厂水处理工作人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

电厂水处理设备运行与维护/全国电力职业教育教材编审委员会组编；黄成群，李艳萍主编. —北京：中国电力出版社，2012.12

全国电力高职高专“十二五”规划教材. 电力技术类（动力工程）专业系列教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 3924 - 8

I. ①电… II. ①全…②黄…③李… III. ①电厂—水处理设施—高等教育—教材 IV. ①TM621.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 309071 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>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 12 月第一版 2012 年 12 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.75 印张 575 千字
定价 42.80 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

全国电力职业教育教材编审委员会

主 任 薛 静

副 主 任 张薛鸿 赵建国 刘广峰 马晓民 杨金桃 王玉清
文海荣 王宏伟 王宏伟_(女) 朱 飙 何新洲 李启煌
陶 明 杜中庆 杨义波 周一平

秘 书 长 鞠宇平 潘劲松

副秘书长 刘克兴 谭绍琼 武 群 黄定明 樊新军

委 员 (按姓氏笔画顺序排序)

丁 力	马晓民	马敬卫	文海荣	方国元	方舒燕	毛文学
王 宇	王火平	王玉彬	王玉清	王亚娟	王宏伟	王宏伟 _(女)
王俊伟	兰向春	冯 涛	任 剑	刘广峰	刘克兴	刘家玲
刘晓春	朱 飙	汤晓青	阮予明	齐 强	何新洲	余建华
吴金龙	吴斌兵	宋云希	张小兰	张志锋	张进平	张惠忠
李启煌	李建兴	李高明	李道霖	李勤道	杜中庆	杨义波
杨金桃	陈延枫	周一平	屈卫东	武 群	罗红星	罗建华
郑亚光	郑晓峰	胡 斌	胡起宙	赵建国	饶金华	倪志良
郭连英	陶 明	盛国林	章志刚	黄红荔	黄定明	黄益华
黄蔚雯	龚在礼	曾旭华	董传敏	佟 鹏	解建宝	廖 虎
谭绍琼	樊新军	潘劲松	潘汪杰	操高城	戴启昌	鞠宇平

参 与 院 校

山东电力高等专科学校
山西电力职业技术学院
四川电力职业技术学院
三峡电力职业学院
武汉电力职业技术学院
江西电力职业技术学院
重庆电力高等专科学校

西安电力高等专科学校
保定电力职业技术学院
哈尔滨电力职业技术学院
安徽电气工程职业技术学院
福建电力职业技术学院
郑州电力高等专科学校
长沙电力职业技术学院

动力工程专家组

组 长 李勤道 何新洲

副组长 杨建华 董传敏 朱 飙 杜中庆

成 员 (按姓氏笔画顺序)

丁 力 阮予明 齐 强 屈卫东 武 群 饶金华 盛国林

黄定明 黄蔚雯 龚在礼 曾旭华 佟 鹏 潘汪杰 操高城

本书编写组

组 长 黄成群

副组长 李艳萍

组 员 王 颂 张中华 马 克 梅其政 杨文祥 徐彦芹
游绍碧 穆顺勇 李亚军

序

为深入贯彻《国家中长期教育改革和规划纲要》（2010—2020）精神，落实鼓励企业参与职业教育的要求，总结、推广电力类高职高专院校人才培养模式的创新成果，进一步深化“工学结合”的专业建设，推进“行动导向”教学模式改革，不断提高人才培养质量，满足电力发展对高素质技能型人才的需求，促进电力发展方式的转变，在中国电力企业联合会和国家电网公司的倡导下，由中国电力教育协会和中国电力出版社组织全国14所电力高职高专院校，通过统筹规划、分类指导、专题研讨、合作开发的方式，经过两年时间的艰苦工作，编写完成本套系列教材。

全国电力高职高专“十二五”规划教材分为电力工程、动力工程、实习实训、公共基础课、工科基础课、学生素质教育六大系列。其中，动力工程专业系列汇集了电力行业高等院校专家的力量进行编写，各分册主编为该课程的教学带头人，有丰富的教学经验。教材以行动导向形式编写而成，既体现了高等职业教育的教学规律，又融入电力行业特色，适合高职高专动力工程专业的教学，是难得的行动导向式精品教材。

本套教材的设计思路及特点主要体现在以下几方面。

（1）按照“项目导向、任务驱动、理实一体、突出特色”的原则，以岗位分析为基础，以课程标准为依据，充分体现高等职业教育教学规律，在内容设计上突出能力培养为核心的教学理念，引入国家标准、行业标准和职业规范，科学合理设计任务或项目。

（2）在内容编排上充分考虑学生认知规律，充分体现“理实一体”的特征，有利于调动学生学习积极性。是实现“教、学、做”一体化教学的适应性教材。

（3）在编写方式上主要采用任务驱动、项目导向等方式，包括学习情境描述、教学目标、学习任务描述、任务准备、相关知识等环节，目标任务明确，有利于提高学生学习的专业针对性和实用性。

（4）在编写人员组成上，融合了各电力高职高专院校骨干教师和企业技术人员，充分体现院校合作优势互补，校企合作共同育人的特征，为打造中国电力职业教育精品教材奠定了基础。

本套教材的出版是贯彻落实国家人才队伍建设总体战略，实现高端技能型人才培养的重要举措，是加快高职高专教育教学改革、全面提高高等职业教育教学质量的具体实践，必将对课程教学模式的改革与创新起到积极的推动作用。

本套教材的编写是一项创新性的、探索性的工作，由于编者的时间和经验有限，书中难免有疏漏和不当之处，恳切希望专家、学者和广大读者不吝赐教。

全国电力职业教育教材编审委员会

前 言

本书由校企合作，共同开发。本书突破传统教材在内容上的编写方式，采用行动导向的编写方式。基于实际工作过程设计学习情境，每一学习情境内容按照教学目标、任务描述、任务准备、相关知识、任务实施、知识拓展几个部分递进完成。读者带着任务学习，重点突出任务实施部分，即设备运行、运行参数控制、常见故障及处理。知识拓展部分是在完成基本任务的基础上提升专业水平，介绍新技术、新工艺、新设备等。本教材强调实际操作能力的培养，体现工学结合原则，并将最新的研究成果、先进的教学手段和教学方式、教学改革成果等纳入教材中，做到有针对性、实用性和科学性。

本书共十个学习情境，学习情境一～六主要由重庆电力高等专科学校黄成群编写；学习情境七～十主要由山东电力高等专科学校李艳萍编写；学习情境五中任务三、学习情境十中任务一由保定电力职业技术学院王颂编写；保定电力职业技术学院马克、山西电力职业技术学院张中华、重庆电力高等专科学校梅其政、山东电力研究院杨文祥等也参加了某些章节的编写。全书由黄成群统稿。

本书由中广核台山核电合营有限公司洪锦从正研级高级工程师和山东电力研究院宋丽莎高级工程师审稿，主审老师对本书进行了认真的审阅，提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

本书还特别邀请了中国电厂化学网 CEO 李敬业、大亚湾核电运营有限公司王岱宗、深圳能源妈湾电厂程虹、深圳能源集团冯逸仙、深圳市广前电力有限公司陈泽强五位高级工程师参与审定工作，他们对本书的内容设计和各学习情境内容提出了许多宝贵的意见和建议，在此向他们表示深切的谢意。

编 者

2012 年 11 月

目 录

序

前言

学习情境一	认识锅炉补给水处理	1
学习情境二	运行与维护澄清池	21
学习情境三	运行与维护过滤设备	46
任务一	运行与维护滤池	46
任务二	运行与维护超滤装置	63
学习情境四	运行与维护反渗透装置	80
学习情境五	运行与维护离子交换器	103
任务一	运行与维护逆流再生离子交换器	103
任务二	运行与维护混合离子交换器	147
任务三	运行与维护电除盐装置	164
学习情境六	认识热力系统水处理	184
学习情境七	运行与维护凝结水精处理设备	228
学习情境八	运行与维护给水处理设备	256
任务一	运行与维护全挥发处理设备	256
任务二	运行与维护加氧处理设备	270
学习情境九	运行与维护炉水处理设备	280
学习情境十	认识电厂其他水处理	293
任务一	认识循环冷却水处理	293
任务二	认识发电机内冷水处理	321
任务三	认识废水处理	329
任务四	认识锅炉化学清洗	340
任务五	认识热力设备停用保护	352
任务六	运行与维护水汽集中取样分析装置	356
附录	电厂水处理常用标准	364
参考文献		365

学习情境一 认识锅炉补给水处理

【教学目标】

1. 知识目标

- (1) 理解天然水的杂质及特征。
- (2) 理解水质指标。
- (3) 知道电厂用水的水源。
- (4) 知道锅炉补给水处理系统。

2. 能力目标

- (1) 会识绘锅炉补给水处理系统流程简图。
- (2) 会水质全分析相关计算。
- (3) 能正确分析各水处理设备的功能、主要监测项目。

【任务描述】

锅炉补给水处理是为满足火电厂锅炉用水的要求，通过物理的、化学的手段，将天然水中的悬浮物、胶体和溶解物质等杂质去除的过程。补给水处理是电厂水处理的重要组成部分。班长组织各学习小组在仿真机或实训室环境下，认真分析水源水质特点，编制工作计划后，认识锅炉补给水处理系统及各水处理设备的功能。

【任务准备】

课前预习相关知识部分。根据锅炉补给水水质的要求，分析电厂水源水质特点，经讨论后编制认识锅炉补给水处理的工作计划，并独立回答下列问题。

- (1) 电厂用水水源有哪几种？
- (2) 按照水质天然水可分为哪几类？
- (3) 天然水中主要含有哪些杂质？
- (4) 水中的胶体物质有哪些？
- (5) 水中的溶解物质有哪些？
- (6) 天然水中的二氧化碳从何而来？
- (7) 二氧化碳在天然水中有哪些存在形式？
- (8) 溶解固体、含盐量和电导率表示的意义有何异同？
- (9) 表征硬度大小的单位有哪几种？硬度分为几类？
- (10) 碱度和酸度的含义是什么？
- (11) 水中的碱度有哪几种？各种碱度的相互关系如何？
- (12) 水中的有机物有哪些形态？如何表示其含量？
- (13) 化学耗氧量的意义是什么？ COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 有什么差别？
- (14) 全硅、胶体硅和活性硅的含义及相互关系如何？
- (15) 天然水中硅化合物有哪些形态？

(16) 如何对水质全分析的结果进行校核?

【相关知识】

一、电厂用水的水源

(一) 水在火电厂中的作用

在电厂中,水的用途是多方面的,主要用于发电过程中的能量传递、工质冷却、设备冷却、废渣输送、煤堆喷淋和生活、消防和绿化等场合。在火电厂的生产过程中,水担负着传递能量和冷却的作用。水是整个热力系统的工作介质,也是某些热力设备的冷却介质,可称得上电厂中流动的“血液”。

(二) 电厂用水的水源及水质特点

水源是电厂维持生产的基本保障条件。在选择水源上应兼顾政策性、经济性和环保要求。目前电厂用水的水源主要有地表水和地下水两种。另外,中水也正逐渐成为电厂用水的另一种水源。

1. 地表水

地表水是指流动或静止在陆地表面的水,主要是指江河水、湖泊水、海水和水库水。

(1) 江河水。江河水流域面积广阔,又是敞开流动的水体,所以水质易受自然条件影响,而且随季节变化的幅度大,是水源中最为活跃的部分。江河水的化学组分具有多样性与易变性。

通常江河水中的悬浮物和胶体杂质含量较多,浊度高于地下水,且随地区和季节的不同,差异很大。我国幅员辽阔,大小河川纵横交错,自然地理条件相差悬殊,因而各地区江河水的浊度也相差很大。黄土高原、黄河水系,由于水土流失严重,悬浮物和含砂量较高,随季节变化的范围也很大:冬季枯水季节悬浮物含量有时仅几十毫克/升至几百毫克/升;而夏季多雨季节,可增加到几克/升至数百克/升。东北、华东和中南地区大部分河流的浊度均比较低,只是雨季时河水较浑,平均悬浮物含量 50~400mg/L。

江河水的含盐量及硬度较低,其含盐量一般为 50~500mg/L,硬度一般为 1.0~8.0mmol/L,是电厂用水最合适的水源。江河水最大的缺点是易受工业废水、生活污水及其他各种人为的污染。

(2) 湖泊及水库水。湖泊及水库水主要由江河水 and 降水补给,水质与江河水类似。湖泊及水库水的流动性小,进出水交替缓慢,停留时间较长。其水质的一般特征是:经过长期自然沉淀,浊度较低;化学耗氧量和生化需氧量较高,溶解氧较低。

湖泊水易受生活污水和工业废水的污染,有机物、总氮、总磷的含量普遍较高,甚至出现水质富营养化,藻类大量繁殖,使水产生色、嗅、味,化学耗氧量升高,溶解氧下降。此外,由于水的不断蒸发,湖泊水含盐量会升高。湖泊水按含盐量分为淡水湖水、微咸水湖水和咸水湖水,前两种可作为电厂用水的水源。

由降水作为主要补给的水库水,一般得到较好的水源保护,各种污染物含量和浊度、含盐量都较低,是电厂用水的优质水源。

(3) 海水。海水的盐类含量是常见地表水及地下水的 100 倍上下,其一特点是以氯化钠为主,镁的含量比钙的含量高;另一特点是全世界海洋水的成分大致相近。海水的主要组成为氯离子 18950mg/L、钠离子 10560mg/L、镁离子 1272mg/L、硫酸根离子 2652mg/L、钙

离子 400mg/L、钾离子 380mg/L、溴离子 62mg/L、硼 46mg/L。未经过淡化处理的海水主要用来冷却热交换器设备。在电力行业标准 DL/T 783—2001《火力发电厂节水导则》4.1.1.2 条中指出,滨海电厂的主机凝汽器冷却水应使用海水,辅机应采用海水开式与淡水闭式相结合的冷却系统。

2. 地下水

存在地球表面以下的土壤和岩层中的水称为地下水。

地下水是由雨水和地表水经过地层的渗流而形成的。水在地层渗透过程中,通过土壤和砂砾的过滤作用,悬浮物和胶体已基本或大部分去除,所以地下水浊度普遍较低。

由于地下水长期与石灰石等矿物质接触,溶解了各种可溶性物质,因而水中的含盐量、胶体硅、铁、 CO_2 等通常高于地表水。含盐量的多少及盐类的成分,取决于地下水流经地层的矿物质成分、地下水埋深和与岩石接触时间等。我国水文地质条件比较复杂,各地区地下水含量相差很大。一般情况下,多雨地区如东南沿海地区及西南地区,由于地下水受大量雨水补给,故含盐量相对低些;干旱地区如西北、内蒙古等地,地下水含盐量较高。

如果在土壤中含有较多有机物时,氧气将消耗于生物氧化,产生 CO_2 、 H_2S 等气体,此气体溶于水中,使水具有还原性。还原性的水与高价铁锰矿石反应,使它们以低价离子形态进入水中,因此地下水游离 CO_2 含量高,并普遍含有 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 。

地下水受外界影响小,水质比较稳定,可以用作电厂用水的水源。

3. 中水

中水一词起源于日本,对应给水、排水的内涵而得名,是指洁净程度介于给水与排水之间的水。中水在工业利用方面称为“回用水”,主要是指城市污水或生活污水经处理达到一定的水质标准后,可在一定范围内重复使用的非饮用水。中水作电厂循环冷却水补充水在国外早已有应用,近几年来在国内也逐渐成为研究的热点。

中水可以作为电厂冷却水的补充水。中水水质不稳定,胶体颗粒细小,含盐量高,暂硬较高,含有大量氨氮、磷酸盐及微生物等污染物质。应根据具体水质情况和冷却水系统的水质要求选择有效的城市污水处理措施,以便中水回用。

二、天然水中的杂质及特征

天然水体是海洋、河流、湖泊、沼泽、水库、冰川、地下水等地表和地下储水体的总称,包括水和水中各种物质、水生生物及底质。天然水体在自然循环运动中,无时不与大气、土壤、岩石、各种矿物质、动植物等接触。由于水是一种很强的溶剂,极易与各种物质混杂,所以天然水体中不同程度地含有各种杂质。

天然水中杂质有的呈固态,有的呈液态或气态,它们大多以分子、离子或胶体颗粒状态存在于水中。表 1-1 为天然水中常见的杂质。

天然水中杂质种类很多,按其性质可分为无机物、有机物和微生物;按分散体系,即水中杂质颗粒的大小,分为悬浮物、胶体和溶解物质。水处理实践表明,只要杂质尺寸处在同一范围内,无论何种杂质,其除去方法都基本相同。因此,水处理应用中是按后者进行分类的。下面介绍这些杂质的情况。

表 1-1

天然水中常见的杂质

主要离子		溶解气体		生物生成物	胶体		悬浮物质
阴离子	阳离子	主要气体	微量气体		无机	有机	
Cl^-	Na^+	O_2	N_2	NH_3 、 NO_3^-	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	腐殖质	硅铝铁酸
SO_4^{2-}	K^+	CO_2	H_2S	NO_2^-	$\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$		
HCO_3^-	Ca^{2+}		CH_4	PO_4^{3-}	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$		砂粒
CO_3^{2-}	Mg^{2+}			HPO_4^{2-}			黏土
				H_2PO_4^-			微生物

(一) 悬浮物

悬浮物是指颗粒直径较大，一般在 100nm 以上的微粒。它们在水中是不稳定的，在重力或浮力的作用下易于分离出来。比水密度大的悬浮物，当水静置时或流速较慢时会下沉，在天然水中常见的此类物质是砂子和黏土类无机物；比水密度小的悬浮物，当水静置时会上升，这类物质中常见的是动植物生存过程中产生的物质或死亡后腐败的产物，它们是一些有机物。此外，还有些密度与水相近的，它们会悬浮在水中。近年来，随着工业污染的加剧，一些排入水体的工业污染物也逐渐成为悬浮物的主要部分。

由于悬浮物颗粒对进入水中的光线有折射、反射作用，因此，悬浮物是水发生混浊的主要原因。

(二) 胶体

胶体是指颗粒直径为 1~100nm 之间的微粒。胶体颗粒在水中有布朗运动，它们不能靠静置的方法自水中分离出来。而且，因胶体表面带电，同类胶体之间有同性电荷的斥力，不易相互黏合成较大的颗粒，所以胶体在水中是比较稳定的。

在天然水中，胶体物质既有有机物，也有无机物，一般以有机胶体为主。有些溶于水的高分子化合物，由于分子较大，具有与胶体相似的性质，也被看做有机胶体。有机胶体物质多来自土壤的有机质，来自动植物的生物分解作用，如腐殖质、氨基酸、蛋白质等，它们是水体产生色、嗅、味的主要原因。无机胶体大都是由许多不溶于水的分子组成的集合体，有硅酸盐和铁、铝、锰等物质。硅酸盐是地壳的主要构成成分，岩石和由岩石风化形成的土壤中都以硅酸盐为主。最常见的如石英、长石、花岗岩、高岭土等，它们常以二氧化硅表示。铁、铝氧化物的水合物（氢氧化物）多为胶体状态，它们的溶度积很小，溶解度低，在水中的含量低于 1mg/L。

水中胶体物质的存在，使水在光照下显得浑浊。

(三) 溶解物质

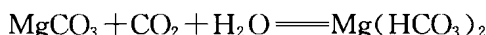
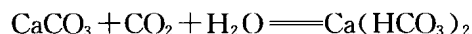
溶解物质是指颗粒直径小于 1nm 的微粒。它们大都以离子或溶解气体状态存在于水中。

1. 离子态杂质

离子态杂质包括阳离子和阴离子，水中常见的阳离子有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Fe^{3+} 和 Mn^{2+} 等，阴离子有 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等。水中离子态杂质来源于水在与岩石、土壤等物质接触的过程中溶解的某些矿物质。不同的矿物质与水接触，就可溶出相应的杂质离子，成为水中各种离子的主要来源。

下面着重介绍天然水中主要离子的来源。

石灰石 (CaCO_3) 和石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 的溶解是 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 的主要来源,白云石 ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) 和菱镁矿 (MgCO_3) 是 Mg^{2+} 的主要来源。 CaCO_3 、 MgCO_3 在水中的溶解度虽然很小,但当水中含有游离态 CO_2 时, CaCO_3 、 MgCO_3 被转化为较易溶的 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 而溶于水中,其反应为



由于上述反应,所以天然水中存在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 。在含盐量不大的水中, Mg^{2+} 的含量一般为 Ca^{2+} 的 25%~50%, 水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 是形成水垢的主要成分。

钠盐矿、钾盐矿是 Na^+ 、 K^+ 的主要来源。含钠的矿石在风化过程中易于分解,释放出 Na^+ , 所以地表水和地下水中普遍含有 Na^+ 。因为钠盐的溶解度很高,在自然界中一般不存在 Na^+ 的沉淀反应,所以在高含盐量水中, Na^+ 是主要阳离子。天然水中 K^+ 的含量远低于 Na^+ , 这是因为含钾的矿物比含钠的矿物抗风化能力大,所以 K^+ 比 Na^+ 较难转移至天然水中。由于在一般水中 K^+ 的含量不高,而且化学性质与 Na^+ 相似,因此在水质分析中,常以 ($\text{K}^+ + \text{Na}^+$) 之和表示它们的含量,并取加权平均值 25g/mol 作为两者的摩尔质量。

天然水中都含有 Cl^- , 这是因为水流经地层时,溶解了其中的氯化物,所以 Cl^- 几乎存在于所有的天然水中。氯化物主要存在于古海洋沉积物和干旱地区内陆湖的沉积物中,还存在于曾经遭受海水侵蚀过的岩石孔隙中以及海洋泥质岩中。在所有这些岩石和沉积物中,几乎都是 Na^+ 和 Cl^- 伴随在一起。

硝酸根的存在常表明水体曾有生物污染,如果有亚硝酸根则表明仍存在生物污染,此时甚至还可检出氨(铵、胺)。

由上可知,天然水中最常见的阳离子是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ , 阴离子是 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 HSiO_3^- , 某些地区的地下水中还含有较多的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 。

2. 溶解气体

天然水中常见的溶解气体有 O_2 和 CO_2 , 有时还有 H_2S 、 SO_2 和 NH_3 等。

天然水中 O_2 的主要来源是大气中 O_2 的溶解,因为空气中含有 20.95% 的氧,水与大气接触使水体具有自充氧的能力。另外,水中藻类的光合作用也产生一部分的氧,但这种光合作用并不是水体中氧的主要来源,因为在白天靠这种光合作用产生的氧,又在夜间的新陈代谢过程中消耗了。

由于水中微生物的呼吸、有机质的降解以及矿物质的化学反应都消耗氧,如水中氧不能从大气中得到及时补充,水中氧的含量可以降得很低。所以,一般情况下,地下水的氧含量总是比地表水低,地表水氧的含量一般在 0~14mg/L 之间。

天然水中 CO_2 的主要来源为水中或泥土中有机物的分解和氧化,地下水中的 CO_2 还因地层深处进行的地质过程而生成,如碳酸氢钙的分解。地表水的 CO_2 含量常不超过 20~30mg/L, 地下水的 CO_2 含量较高,有时达到几百毫克/升。

天然水中 CO_2 并非来自大气,而恰好相反,它会向大气中析出,因为大气中 CO_2 的体积百分数只有 0.03%~0.04%, 与之相对应的溶解度仅为 0.5~1.0mg/L。

水中 O_2 和 CO_2 的存在是使金属发生腐蚀的主要原因。

(四) 主要无机化合物

1. 碳酸化合物

在天然水中，特别是在低含盐量的水中，碳酸化合物是主要成分，是造成结垢和腐蚀的主要因素，是锅炉水处理的重要去除对象。

在水中碳酸化合物有四种不同的存在形态：溶于水的气体二氧化碳、分子态碳酸、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} ，这四种化合物统称为碳酸化合物，气体二氧化碳和分子态碳酸称为游离二氧化碳。在水溶液中，这四种碳酸化合物有以下平衡关系：

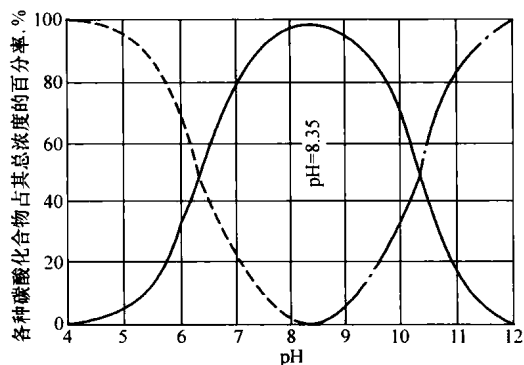
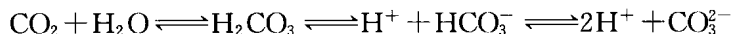


图 1-1 各种碳酸化合物的相对量与 pH 值的关系 (25°C)

----- CO_2 ——— HCO_3^- CO_3^{2-}

由上述平衡关系可计算出不同的 pH 值时，各种碳酸化合物的百分率。图 1-1 所示为 25°C 时，上述关系的曲线。由图 1-1 可以看出，当 $\text{pH} < 4.2$ 时，水中只有 CO_2 一种形态；当 $\text{pH} > 12.1$ 时，水中只有 CO_3^{2-} 一种形态；当 pH 值为 4.2~8.3 时，水中 CO_2 和 HCO_3^- 并存，其中在 $\text{pH}=6.35$ 处， CO_2 和 HCO_3^- 各占 50%；当 pH 值为 8.3~12.1 时，水中 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 并存，其中在 $\text{pH}=10.33$ 处， HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 各占 50%。

固体 CaCO_3 在水中的溶解和析出是水中常见的反应。例如，含有游离 CO_2 的水溶解地层 CaCO_3 是天然水中含有 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的来源。又如，用生水供给锅炉会因析出 CaCO_3 而形成水垢。 CaCO_3 的这些反应与它的化学特性有关。 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 之间的转换关系： $2\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{CO}_3^{2-}$ ，取决于水中游离 CO_2 量。当水中游离 CO_2 增多时，反应向生成 HCO_3^- 的方向转移， CO_3^{2-} 减少，会促使固体 CaCO_3 溶解；当 CO_2 减少时，反应向生成 CO_3^{2-} 的方向转移，会促使 CaCO_3 沉淀生成。

2. 硅酸化合物

硅酸化合物是天然水中的一种主要杂质，它是因水流经地层时，与含有硅酸盐和铝硅酸盐岩石相作用而带入的。一般地下水的硅酸化合物含量比地表水多，天然水中硅酸化合物含量一般在 1~20mg/L SiO_2 的范围内，地下水有时高达 60mg/L。

硅酸化合物比较复杂，在水中存在的形态包括离子态、分子态和胶体。硅酸化合物的形态与其本身含量、pH 值、其他离子（如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）含量等有关。

硅酸的通式为 $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ，当 $x=1$ ， $y=2$ 时，称为正硅酸 H_4SiO_4 ；当 $x=1$ ， $y=1$ 时，称为偏硅酸（或硅酸） H_2SiO_3 ；当 $x>1$ 时，硅酸呈聚合态，称为多硅酸。当水中 SiO_2 的浓度增大时，它会聚合成二聚体、三聚体、四聚体等，这些聚合体在水中很难溶解。随聚合体的增大， SiO_2 会由溶解态转变成胶态，甚至成凝胶态自水中析出。

不同的 pH 值条件下，由 $\text{H}_2\text{SiO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HSiO}_3^- \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{SiO}_3^{2-}$ 平衡关系，可计算出各种硅酸化合物的相对量，其结果见表 1-2。

表 1-2

不同的 pH 值时各种硅酸化合物的相对量

硅酸形式 \ pH 值	5	6	7	8	9	10	11
H_2SiO_3 (%)	100.0	100.0	99.7	96.9	75.8	23.5	2.6
HSiO_3^- (%)			0.3	3.1	24.2	75.3	84.0
SiO_3^{2-} (%)						1.2	13.4

从表 1-2 可以看出, 当 pH 值较低时, 硅酸以游离态分子形式存在, 水中胶态硅酸增多; 当 $\text{pH} > 7$ 时, 水中同时有 H_2SiO_3 和 HSiO_3^- ; 当 $\text{pH} > 11$ 时, 水中以 HSiO_3^- 为主; 只有碱性较强的水中才出现 SiO_3^{2-} 。

3. 铁的化合物

在天然水中铁是常见的杂质。水中的铁有亚铁 (Fe^{2+}) 和高铁 (Fe^{3+}) 两种。在深井水中因溶解氧的浓度很小和水的 pH 值较低, 水中会有大量 Fe^{2+} 存在, 有多达 10mg/L 以上的, 这是因为常见的亚铁盐类溶解度较大, 水解度较小, Fe^{2+} 不易形成沉淀物。

当水中溶解氧浓度较大和 pH 值较高时, Fe^{2+} 会氧化成 Fe^{3+} , 而 Fe^{3+} 的盐类很容易水解, 从而转变成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀物或胶体。在地表水中, 由于溶解氧的含量较多, 所以 Fe^{2+} 的量通常很小。但在含有腐殖酸的沼泽水中, Fe^{2+} 的量可能较多, 因为这种水的 pH 值常接近于 4, Fe^{2+} 会与腐殖酸形成络合物, 这种络合物不易被溶解氢氧化。在 pH 值为 7 左右的地表水中, 一般只含有呈胶溶态的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。

(五) 有机物

天然水中的有机物是十分复杂的分子集合体, 按其形态有溶解物、胶体和悬浮状态三种形式。

有机物主要来自土壤中的腐殖质、工业废水和生活污水。腐殖质是由动植物残体经微生物新陈代谢产生, 为暗色、含氮的芳香结构的酸性高分子化合物。腐殖质中的有机物按其性质大体上可分为腐殖酸和富里酸, 腐殖酸可溶于碱性溶液, 但不溶于酸性溶液, 在水中多呈胶体状态; 富里酸可溶于酸, 在水中多是溶解状态。在水处理中, 过去讨论的重点往往是腐殖酸、富里酸等天然有机物, 但近年来因为工业废水污染严重, 地表水中存在的有机物主要是工业污染物, 因此, 有机物的组成更为复杂。

水中有机物在进行生物氧化分解时, 需要消耗水中的溶解氧, 在缺氧条件下腐败, 恶化水质、破坏水体。

(六) 微生物

天然水中的微生物种类繁多, 常见的微生物有藻类、细菌、真菌和原生动物, 其中藻类、细菌和真菌对用水系统的影响较大。

藻类广泛分布于各种水体和土壤中, 最常见的有蓝藻、绿藻和硅藻等, 它们是水体产生黏泥和臭味的主要原因之一。藻类的细胞内含有叶绿素, 它能进行光合作用, 其结果一是使水中溶解氧增加, 二是使水的 pH 值上升。

细菌是一类形体微小、结构简单、多以二分裂方式进行繁殖的原核生物, 是自然界中分布最广、个体数量最多的有机体。细菌呈球状、杆状、弧状、螺旋状等形状, 它们通常是以

单细胞或多细胞的菌落生存。在循环冷却水中常见的细菌主要有铁细菌、硫酸盐还原菌和硝化细菌。

真菌是具有丝状营养体的单细胞微小植物的总称。当真菌大量繁殖时会形成一些丝状物，附着于金属表面形成黏泥。

微生物在循环冷却水系统中极易生长繁殖，其结果是使水的颜色变黑，发生恶臭，同时会形成大量黏泥，严重影响冷却水系统的正常运行。

三、电厂用水的水质指标

水质是指水和其中杂质共同表现出的综合特性，也就是常说的水的质量。天然水体的水质是由所含杂质的数量和组成决定的。

由于工业用水的种类繁多，因此对水质的要求也各不相同。电厂用水的水质指标有两类：一类是表示水中杂质离子组成的成分指标，如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 等；另一类指标是表示某些化合物之和或表征某种性能，这些指标是由于技术上的需要而专门制定的，故称为技术指标，见表 1-3。

表 1-3 电厂用水的技术指标

指标名称	符号	单位	指标名称	符号	单位
pH 值	pH	/	硬度	YD 或 H	mmol/L
全固体	QG	mg/L	碳酸盐硬度	H_T	mmol/L
悬浮固体	SS	mg/L	非碳酸盐硬度	H_F	mmol/L
浊度	ZD	FTU	碱度	JD 或 B	mmol/L
透明度	TD	cm	酸度	SD 或 A	mmol/L
总溶解固体	TDS	mg/L	化学耗氧量	COD	mg/L O_2
灼烧减少固体	SG	mg/L	生化需氧量	BOD	mg/L O_2
含盐量	YL 或 C	mg/L 或 mmol/L	总有机碳	TOC	mg/L
电导率	DD	$\mu\text{S}/\text{cm}$	氨氮	$\text{NH}_3\text{-N}$	mg/L
稳定度	—	—	菌落总数	—	CFU/mL

（一）悬浮固体和浊度

1. 悬浮固体

悬浮固体 (SS) 是水样在规定的条件下，经过滤能够分离出来的固体，单位为 mg/L。这项指标仅能表征水中颗粒较大的悬浮物，而不包括能穿透滤纸的颗粒小的悬浮物及胶体，所以有较大的局限性。此法需要将水样过滤，滤出的悬浮物需经烘干和称量等手续，操作麻烦，不易用作现场的监督指标。

2. 浊度

浊度是反映水中悬浮物和胶体含量的一个综合性指标，它是利用水中悬浮物和胶体颗粒对光的透射或散射作用来表征其含量的一种指标，即表示水浑浊的程度。

利用测量透射光强度的浊度仪称为透射光浊度仪，测得的浊度称为透射光浊度；利用测

量散射光强度的浊度仪称为散射光浊度仪，测得的浊度称为散射光浊度。此外，浊度仪还可对透射光和散射光均进行测量，测得的浊度称为积分球浊度。

浊度通过专用仪器测定，操作简便。由于标准水样浊度的配制方法不同，所使用的单位也不相同，目前以福马胂聚合物〔由硫酸胂 $\text{N}_2\text{H}_4\text{SO}_4$ 和六次甲基四胺 $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ 配制成的浑浊液〕作为浊度标准的对照溶液，与水样相比较，所测得的浊度单位用福马胂单位。采用福马胂作为对照溶液，利用透射光原理测得的浊度称为透射光福马胂浊度，用 FTU 表示；采用福马胂作为对照溶液，利用散射光原理测得的浊度称为散射光福马胂浊度，用 NTU 表示。后者有较好的准确度和精密度。

（二）表征水中溶解盐类的指标

1. 含盐量

含盐量是表示水中各种溶解盐类的总和。其测定方法是先分析出水中所有离子的含量，然后再计算出含盐量的值。含盐量有两种表示方法：一是质量表示法，即将水中各种阴、阳离子的含量以质量浓度（mg/L）为单位全部相加；二是物质的量浓度表示法，即将水中各种阳离子（或阴离子）均按带一个电荷的离子为基本单元，计算其物质的量浓度（mmol/L），然后将它们（阳离子或阴离子）相加。

由于水质全分析比较麻烦，只能定期（如一个季度或一年）测定，不宜作运行控制指标。

2. 溶解固体

总溶解固体物（TDS）是指在规定的条件下，水样经过滤除去悬浮固体后，经蒸发、干燥所得的残渣重量，单位用 mg/L 表示。这种方法实际测得的是在蒸发时水中不挥发性物质的质量，主要是水中各种溶解性盐类。溶解固体只能近似表示水中溶解盐类的含量，因为在过滤时水中的胶体及部分有机物与溶解盐类一样能穿过滤纸，蒸干时某些物质的湿分和结晶水不能除尽，有些有机物分解了，水中原有的碳酸氢盐全部转换为碳酸盐。

3. 电导率

水中所含的盐类电离，使水具有导电能力，利用测量水的电导率推知水的溶解固体，解决了实测溶解固体的困难。

水的电导率是指在一定温度下， 1cm^3 正方体水的两个相对面之间电阻的倒数，其符号可用 DD 表示，常用单位为 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。水的电导率大小除与水中离子含量有关外，还与离子的种类和水的温度有关。如纯水可解离出少量氢离子和氢氧根离子，在 25°C 下的电导率仅为 $0.055\mu\text{S}/\text{cm}$ ；氢离子和氢氧根离子的电导率高于其他盐类离子，多价离子高于 1 价离子。一般情况下，温度每改变 1°C ，电导率将发生 1.4% 的变化，通常取 25°C 的电导率为标准值，以便于比较。

虽单凭电导率不能计算水中含盐量，但在水中离子的组成比较稳定的情况下，可以根据试验求得电导率与含盐量的关系，将测得的电导率换算成含盐量，因而在实际应用中可直接以电导率反映水中含盐量。

（三）硬度

硬度是指水中某些易形成沉淀的多价金属离子的总浓度，在天然水中，形成硬度的物质主要是钙、镁离子，所以通常认为硬度就是指水中这两种离子的含量，它在一定程度上表示了水中结垢物质的多少。水中钙离子含量称钙硬（ H_{Ca} ），镁离子含量称镁硬（ H_{Mg} ），总硬