

HUODIANCHANG SHUICHULI
YU HUAXUE JIANDU

王兴国 主编

商福民 季鹏伟 副主编

火电厂水处理 与化学监督



化学工业出版社

21.8

火电厂水处理与化学监督

王兴国 主编

商福民 季鹏伟 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要介绍了与火电厂密切相关的水及其处理方法以及化学监督等方面的知识。本书简明易懂,以实用为主,对于理论和公式不做展开,对现场运行操作技术给予了充分重视,突出了离子交换工艺原理、组合形式以及设备的运行程序和操作步骤的内容,同时针对目前火电厂的金属腐蚀与防护、循环水、冲灰水的结垢与腐蚀等出现较多的问题,书中进行了全面的介绍。

本书可供火电厂非化学专业的学生和技术人员以及高等职业技术学校的师生使用,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水处理的研究、设计和应用的工程技术人员和管理人员的工作参考书。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂水处理与化学监督/王兴国主编. —北京:化学工业出版社, 2008.2
ISBN 978-7-122-01982-0

I. 火… II. 王… III. ①火电厂-水处理②火电厂-
电厂化学-监督管理 IV. TM621.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 012400 号

责任编辑:戴燕红
责任校对:王素芹

文字编辑:冯国庆
装帧设计:王晓宇



出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司
装订:三河市延风装订厂
720mm×1000mm 1/16 印张11½ 字数226千字 2008年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)* 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

火力发电厂水处理与化学监督是一项十分重要的工作，它是保证电厂正常发电的前提。对于从事与火电厂相关专业的学生和工程技术人员，掌握一定的电厂水处理和化学知识，对于做好本职工作和配合全厂的其他工作具有非常重要的意义。

考虑到本书主要为火电厂非化学专业人员使用的特点，在前面两章中简要介绍了水的相关知识和与电厂水处理有关的化学知识，目的是能使读者对书中出现的相关工艺有深入的了解，除此之外，本书力求实用为主、简明易懂，对于理论和公式不做展开，对现场运行操作技术给予了充分重视，突出了离子交换工艺原理、组合形式以及设备的运行程序和操作步骤的内容，同时针对目前火电厂的金属腐蚀与防护、循环水、冲灰水的结垢与腐蚀等出现较多的问题，书中进行了全面的介绍。

本书可供火电厂非化学专业的学生和技术人员以及高等职业技术学校的师生使用，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水处理的研究、设计和应用的工程技术人员和管理人员的工作参考书。

限于水平，书中不足之处在所难免，诚恳希望读者批评指正。

编 者

2008 年 1 月

目 录

绪论	1
一、火力发电厂用水	1
二、火力发电厂中水处理的重要性	2
三、热力发电厂的水处理工作内容	3
四、热动专业学习本课程的目的	4
思考题	4
第一章 天然水及其水质特性	5
第一节 水及其基本特性	5
一、水的异常特性	5
二、水的异常特性与水分子结构的关系	7
三、天然水的分布及水循环	9
第二节 天然水中的杂质及水质指标	10
一、天然水中的杂质	10
二、水质指标	11
第三节 我国火电厂用的天然水	14
思考题	15
第二章 水化学基础知识	16
第一节 天然水的化学成分	16
一、天然水中的主要无机离子	16
二、天然水中主要溶解气体	18
三、天然水中其他化合物	19
第二节 水化学概述	20
一、溶液	20
二、浓度	21
三、化学反应速率与化学平衡	21
四、电解质溶液	23
五、酸碱平衡和溶液的 pH 值	25
六、络合平衡	27
七、沉淀和溶解	29
思考题	30

第三章 炉外水处理	31
第一节 水的沉淀处理	31
一、水的混凝处理	31
二、水的沉淀软化	38
三、沉淀设备	39
第二节 水的过滤处理	43
一、过滤原理	43
二、过滤过程中的水头损失	44
三、滤料	44
四、影响过滤的因素	45
五、过滤系统设备	46
第三节 水的离子交换处理	48
一、离子交换的基本知识	48
二、离子交换原理	55
三、固定床离子交换器结构、运行	58
四、水的离子交换	63
第四节 水的其他除盐方法	73
一、蒸馏	74
二、电渗析除盐	74
三、反渗透除盐	78
思考题	80
第四章 热力系统设备腐蚀及其防止	81
第一节 概述	81
一、金属腐蚀的分类	81
二、电化学腐蚀	83
三、影响电化学腐蚀的因素	87
第二节 热力设备腐蚀的类型及特点	90
一、气体腐蚀	91
二、沉积物下的腐蚀	93
三、水蒸气腐蚀	95
四、应力腐蚀	95
五、有机物腐蚀	96
六、汽轮机的酸性腐蚀	96
七、汽轮机的其他腐蚀类型	97
八、热力设备停用腐蚀	98
第三节 防止热力设备系统腐蚀的措施	99

一、尽量避免金属表面产生氧化物	99
二、新建锅炉启动前必须进行化学清洗	99
三、热力除氧设备及时投入运行	99
四、减少给水中铁、铜的含量, 防止给水污染	100
五、运行锅炉定期进行化学清洗	100
六、热力设备停(备用)期的保护	101
七、热力设备腐蚀的检查	104
第四节 锅炉化学清洗	105
一、锅炉化学清洗的必要性	105
二、锅炉化学清洗的药品	106
三、化学清洗前的准备工作	109
四、化学清洗步骤	110
五、化学清洗后的处理和评价	112
思考题	112
第五章 水汽系统水处理	113
第一节 凝结水处理	113
一、凝结水的过滤处理	114
二、凝结水的混合床除盐	116
第二节 给水处理	118
一、给水除氧	118
二、给水 pH 值的调节	121
三、给水中性处理	123
第三节 水垢的形成及防止	125
一、水垢与水渣	125
二、常见的水垢	126
三、水垢的危害和防止方法	128
四、易溶盐“隐藏”现象	129
第四节 锅内磷酸盐处理	130
一、磷酸盐防垢处理	131
二、协调 pH-磷酸盐处理	133
思考题	135
第六章 冷却水处理	136
第一节 凝汽器铜管有机附着物的形成与防止	136
一、有机附着物的形成	136
二、有机附着物的防止	137
第二节 冷却水系统的结垢与防止	138

一、冷却水系统的结垢	139
二、防止冷却水系统结垢的方法	139
第三节 凝汽器铜管冷却水侧的腐蚀与防止	142
一、铜管腐蚀类型和特征	143
二、防止铜管腐蚀的方法	145
第四节 凝汽器铜管的清洗	148
一、胶球清洗	148
二、化学清洗	149
思考题	149
第七章 蒸汽的污染及其防止	151
第一节 蒸汽的污染	151
一、饱和蒸汽带水	151
二、蒸汽溶解盐类	153
第二节 蒸汽流程中的盐类沉积	155
一、过热器中的盐类沉积	155
二、汽轮机内的盐类沉积	156
第三节 获得清洁蒸汽的方法	157
一、减少给水中的杂质量	157
二、汽包锅炉采取排污措施	157
三、汽包内装设提高蒸汽质量的设备	158
四、加强汽水质量的监督	158
第四节 直流锅炉水处理简介	162
一、给水中杂质在过热蒸汽中的溶解情况	162
二、给水中杂质在直流锅炉内的沉积	162
三、直流锅炉的水处理	163
思考题	164
第八章 电力用油	165
第一节 电力用油的分类及质量标准	165
第二节 电力用油在设备中的作用	166
一、汽轮机油的作用	166
二、变压器油的作用	167
第三节 油品的理化性质及使用性能	168
一、油品的劣化	168
二、油品的理化性质和使用性能	169
第四节 汽轮机油的使用及维护	171

一、运行汽轮机油的监督	172
二、运行汽轮机油的维护	172
三、废油再生	173
思考题	174
参考文献	175

绪 论

一、火力发电厂用水

1. 水在火力发电厂中的作用

火力发电厂是利用热能转变成机械能而进行发电的，在我国普遍采用的燃料是煤炭，个别电厂利用天然气或石油作燃料。其生产过程为：水在锅炉中吸收燃料燃烧放出的热能变成过热蒸汽进入汽轮机，在汽轮机中，蒸汽的热能转变为机械能，通过主轴带动发电机发电，最终完成能量的转化。

在上述能量转化过程中，水是能量转换的唯一工质。除此以外，在火电厂中，水还是普遍采用的冷却介质：将汽轮机的乏汽冷凝成水循环做功；将被加热的润滑油冷却到常温下循环使用等。所以，水、汽质量对机组的安全运行起着重要的作用。

目前，我国制造的锅炉、汽轮机机组的蒸汽参数和容量见表 0-1。随着机组蒸汽参数的提高，对水汽质量的要求也越来越高。

表 0-1 热力发电厂机组参数与容量

蒸汽参数和容量	压力/MPa		温度/℃		机组容量/MW
	锅炉	汽轮机	锅炉	汽轮机	
低温低压机组	1.37	1.27	350	340	1.5~3
中温中压机组	3.92	3.42	450	435	6~50
高温高压机组	9.81	8.83	540	535	25~100
超高压机组	13.73	13.24	540	535	125~200
亚临界压力机组	16.67	16.18	570	565	300

2. 汽水损失

在发电厂中，水汽循环过程有以下主要原因会造成汽水损失：

- ① 锅炉排污放水，安全门和过热蒸汽放汽门对空排汽、蒸汽吹灰和加热燃油用气；
- ② 汽轮机轴封处连续向外排汽，以及抽气器和除氧器排气；
- ③ 各种水箱的溢流和热水蒸发；
- ④ 管道系统法兰盘不严和阀门泄漏等；
- ⑤ 厂内生活用汽、化学分析来样流失等；
- ⑥ 供热电厂的蒸汽在汽轮机内做功后，部分或全部抽出供给热用户，因热用

户的用热方式不同，供热系统复杂等，送出的蒸汽大部分不能回收。

为维持发电厂热力系统的正常水汽循环，需不断补充这些损失，这部分水称为补给水。正常运行时，凝汽式发电厂的补给水率不超过 2%~4%；供热电厂的补给水率较大，有的供热电厂补给水率达到 100%。

3. 汽水系统水的名称

由于水在热力发电厂水汽循环系统中所经历的过程不同，其水质常有较大的差别。因此，根据实际上的需要，常给予这些水以不同的名称，现简述如下。

(1) 生水

生水是未经任何处理的天然水（如江河、湖、地下水等）。在热力发电厂中，生水是制取补给水的原料，另外还用在冷却转动机械的轴承以及供消防用等。

(2) 锅炉补给水

生水经过各种方法净化处理后，用来补充热力发电厂汽水损失的水称为锅炉补给水。锅炉补给水按其净化处理方法的不同，又可分为软化水、蒸馏水和除盐水等。

(3) 汽轮机凝结水

在汽轮机中做功后的蒸汽经冷凝成的水，称为汽轮机凝结水。

(4) 疏水

各种蒸汽管道和用汽设备中的蒸汽凝结水，称为疏水。它经疏水器汇集到疏水箱或并入凝结水系统中。热力发电厂中疏水系统往往比较复杂。

(5) 返回凝结水

热电厂向热用户供热后，回收的蒸汽凝结水称为返回凝结水（简称返回水）。其中又有热网加热器凝结水和生产返回凝结水之分。

(6) 给水

送进锅炉的水称为给水。凝汽式发电厂的给水，主要由汽轮机凝结水、补给水和各种疏水组成。热电厂的给水组成中，还包括返回凝结水。

(7) 锅炉水

在锅炉本体的蒸发系统中流动着的水称为锅炉水，简称炉水。

(8) 冷却水

用作冷却介质的水称为冷却水。在电厂中，它主要是指通过凝汽器用以冷却汽轮机排汽的水。

二、火力发电厂中水处理的重要性

热力系统中水的品质是影响发电厂热力设备（锅炉、汽轮机等）安全、经济运行的重要因素之一。没有经过净化处理的天然水含有许多杂质，这种水如进入水汽循环系统，将会造成各种危害。为了保证热力系统中有良好的水质，必须对水进行适当的净化处理和严格地监督汽水质量。

自然界的水中总是含有杂质的，如不经过处理或处理不合格就直接送给锅炉，会引起以下危害。

1. 热力设备结垢

含有杂质的水进入锅炉或其他热交换器，运行一段时间后，由于水的蒸发浓缩、某些盐类的热分解等，受热面上会结有水垢。结垢易在热负荷较高部位产生，由于水垢的传热能力只有金属的几百分之一，因而极易造成金属管壁过热，促使金属强度下降，造成局部管道变形、鼓包、甚至爆管等严重事故。另外，如结有铁垢，则还会引起垢下腐蚀。结垢还会造成燃料消耗的增加。当凝汽器铜管结有水垢时，凝汽器真空下降，汽轮机出力降低，严重时被迫停机，造成重大经济损失。

2. 热力设备腐蚀

水质不良会引起热力设备的腐蚀。腐蚀导致设备使用寿命缩短。水中杂质增多，加剧结垢过程，又进一步促进腐蚀。水中某些杂质和腐蚀产物如被蒸汽带到过热器和汽轮机中沉积下来，则将严重影响过热器及汽轮机的安全运行。

3. 过热器和汽轮机积盐

水质不良会导致蒸汽不纯。蒸汽带出的杂质会在过热器内沉积，引起管壁过热而爆管；在汽轮机内沉积，会降低汽轮机热效率和出力。特别是高参数大容量机组，其高压级蒸汽通道截面积较小，少量积盐也会大大增加蒸汽流动的阻力，汽轮机出力下降。积盐严重时，推力轴承负荷增大，隔板弯曲，造成停机事故。

总之，热力设备的结垢、积盐、腐蚀，会导致热力设备的使用年限降低、年利用时间（h）减少，检修工作量和检修费用增大。

为了尽可能地减少热力设备的结垢、积盐、腐蚀，不仅要保证有良好的汽水质量，而且要求热力设备有良好的安装、检修和合理的运行方式。

三、火力发电厂的水处理工作内容

火力发电厂的水处理工作主要包括如下的内容。

① 净化生水，制备热力系统所需质量的补给水。它包括除去天然水中的悬浮物和胶体状态杂质的澄清、过滤等处理；除去水中溶解的钙离子、镁离子的软化处理；或除去水中全部溶解盐类的除盐处理等。这些制备补给水的处理，通常称为炉外水处理。

② 对给水要进行除氧、加药等处理。

③ 对于汽包锅炉要进行锅炉水的加药处理和排污，这些工作称为锅内水处理。

④ 对于直流锅炉机组或某些亚临界压力汽包锅炉的机组，则要进行汽轮机凝结水的净化处理。

⑤ 在热电厂中，对生产返回凝结水，要进行除油、除铁等净化处理。

⑥ 对冷却水要进行防垢、防腐和防止有机附着物等处理。

⑦ 对热力系统各部分的汽水质量要进行监督。

此外，化学清洗热力设备以及机炉停运期间的保养工作，与水处理有直接关系，故也应列入水处理工作。

四、热动专业学习本课程的目的

热动专业学习本课程的目的：深化学生的专业知识和拓宽学生的知识面；能自觉、主动地配合电厂化学的工作；从而高质量地完成热力设备的安装、检修和运行工作。同时可以提高电厂管理人员的素质。

思 考 题

1. 热力发电厂有哪些汽水损失？
2. 天然水未经处理或处理不当作为补给水对设备有什么危害？
3. 热力发电厂的水处理工作主要包括哪些内容？
4. 热动专业人员学习本课程的目的的是什么？

第一章 天然水及其水质特性

水是地面上分布最广的物质，几乎占据着地球表面的 3/4。构成了洋、海、江、湖；此外在高山上和地球南北两极还常年有积雪和冰。地层中存有大量的地下水，大气中也有相当数量的水蒸气。

水分子 (H_2O) 是由两个氢原子和一个氧原子构成的。可是大自然中很纯的水是没有的，因为水是一种溶解能力很强的溶剂，能溶解大气中、地表面和地下岩层里的许多物质，此外，还有一些不溶于水的物质和水混杂在一起。天然水中的杂质虽然种类很多，但在它们的组成中，一般不外乎常见的 H、C、N、O、Na、Mg、Ca、Al、Cl 等 20 多种元素。这些元素除了少数呈单质外，大都形成酸、碱、盐之类的化合物或其他复杂化合物，分散在水中。

水在各种工业部门的生产过程中，常常是不可缺少的物质。各种工业对水质都有一定要求，所以在大多数的情况下，天然水必须经净化处理后才能使用，热力发电厂对它的要求很严格。

热力发电厂中采用的水净化方法是依据热力设备对水质的要求和天然水中杂质的含量来决定的。所以在研究水处理工艺时，首先需要了解天然水中含有杂质的概况，这就是本章所要讨论的内容。

第一节 水及其基本特性

一、水的异常特性

水的异常特性主要有下面几个方面。

1. 熔点和沸点

在 $101.325 \times 10^3 \text{ Pa}$ 的压力下，水的熔点（凝固点）为 0°C ，沸点为 100°C 。常温下水为液体，而且以液体存在的温度范围较广，因此在自然界中绝大部分水都以液体状态存在。水的这一特性与氧族中其他元素 (S、Se、Te) 氢化物的几种性质相比较 (表 1-1) 可发现其特殊性。从表中可以看到 H_2S 、 H_2Se 、 H_2Te 三种氢化物的性质表现出有规律性，按照这种规律推算，水应具有表 1-1 (H_2O) 横行中所列出的数值。按此数值水呈液体状态的温度范围应在 $-100 \sim -80^\circ\text{C}$ 之间，也就是说在常温条件下，水应完全以气体状态存在。

表 1-1 水与同类元素氢化物几种性质的比较

化合物	分子量	熔点/℃	融解热/(kJ/mol)	沸点/℃	蒸发热/(kJ/mol)	偶极矩/ / $\times 10^{-30}\text{C}\cdot\text{m}$
H ₂ O(实际)	18	0	6.02	100	40.67	6.17
H ₂ O(推算)	18	-100	2.00	-80	12.55	
H ₂ S	34	-85.5	2.38	-63.0	18.66	3.67
H ₂ Se	81	-65.7	2.51	-41.3	19.33	1.33
H ₂ Te	130	-51	4.18	-2.2	23.14	<0.66

但事实上,水的实际性质对这一规律来说是异常的。水的熔点(0℃)和沸点(100℃)与推算值相差甚远。水具有异常高的熔点和沸点是水能在自然界中发挥巨大作用的原因之一。

2. 温度体积效应

“热胀冷缩”本是物质变化的一般规律。但水在 0~4℃ 这段温度范围内不服从这一规律,而是随着温度升高其体积反而缩小,密度增大,到 4℃ 时密度最大。在水面温度下降到 0℃ 时,表面水层开始结冰,由于 0℃ 时水的密度为 999.8kg/m³,冰的密度为 916.7kg/m³,故水结冰时体积不是收缩而是膨胀。因而冰比水轻,浮于水面形成表面冰盖,冰盖下面的水层由于表面冰层的隔离,保持着一定的热量。水的这一异常特性,为冬季河流、湖泊结冰时,水生生物的生存创造了极为有利的条件。

此外,当压力增大时,一般物质的凝固点有所升高,热膨胀系数减小,而水的凝固点则随压力升高而略有下降,在 0~45℃ 的范围内,热膨胀系数随压力增高而增大。这些都是水在温度或压力变化时体积效应的异常现象。

3. 比热容和蒸发热

在所有的液体和固体物质中,水具有最大的比热容,即温度升高或降低 1℃ 时,1g 水所吸收或放出的热量比 1g 其他物质要多。由于水的比热容大,江、河、湖、海等水体白天吸收太阳辐射的热量。夜晚又将热量释放至大气中,因而,使环境温度变化幅度不致过分剧烈。此外,利用水的这一特性,在生产中可作为冷却物体或贮存及传递热量的优良载体。

维持地表温度相对恒定的另一原因是水具有较高的蒸发热,每 1g 水的蒸发热比 1g 其他液体的蒸发热要大。据估计,到达地表的太阳辐射的热量约有 1/3 为海洋、河流、湖泊和冰川等水体中水的蒸发所抵消。因此,由于水的比热容和蒸发热大,天然水体具有调节气温的作用。

4. 水的溶解能力

水是一种良好的溶剂,它能溶解各种固体、液体和气体物质。许多物质特别是某些离子型无机盐类在水中不仅有很大的溶解度,而且还能离解为离子。酸、碱、盐等无机化合物和有机化合物都能不同程度地溶于水,因此天然水体中往往溶有各种为水生生物生长和发育所需要的营养物质。此外,水能溶解气体,由于水中溶有

氧气, 为水生生物在天然水体中生存提供了基本的条件。但是, 由于水的溶解能力强, 当工业和农业生产中排出的污染物质溶于水后, 则随水流迁移而扩大污染范围, 因此, 这一特性又是造成天然水体污染的主要原因。

5. 对热的稳定性

水对热的稳定性很高, 在 2000K 的高温下, 其离解率还不到 1/100, 这是水能够经过地球初期炽热气温而存在下来的重要原因。

6. 表面张力

常温下在所有的液体中 (除汞以外), 水具有最大的表面张力。水的表面张力为 $7.28 \times 10^{-4} \text{ N}$, 汞为 $4.85 \times 10^{-3} \text{ N}$, 其他液体多在 $2 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ N}$ 范围内。同时水的各种界面特性, 如毛细、润湿、吸附等现象都很突出, 这一特性在各种物理、化学作用以及在自然界机体生命活动中都有显著的影响。

二、水的异常特性与水分子结构的关系

1. 水分子的结构

在 H_2O 分子中, 三个原子核以氢核为底、氧核为顶呈等腰三角形的方式排列, 如图 1-1(a) 所示。根据对水蒸气分子的测定, 其 $\text{O}-\text{H}$ 距离为 0.096 nm , $\text{H}-\text{H}$ 距离为 0.154 nm , $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ 的键角为 105° 。 H_2O 分子中三个核的周围环绕着 10 个电子, 其中氧原子的两个 $1s$ 电子靠近氧核, 其他六个电子 ($2s^2 2p^4$) 经过轨道杂化形成四条 sp^3 杂化轨道。氧原子中的两个未成对的 $2p$ 电子占据两条杂化轨道, 与两个氢原子的 $1s$ 电子形成两条 $\text{O}-\text{H}$ 共价键, 余下的两对独对电子分别占据另外两条杂化轨道, 如图 1-1(b) 所示。水分子的电子云模型如图 1-1(c) 所示。氢原子的 s 电子云和氧原子的 p 电子云重叠形成整个水分子统一的电子云。由于氧的电负性远大于氢, 电子云密度主要集中在氧核附近, 而在两氢核周围电子出现的概率相对要少得多, 这样在氧核附近的大量电子完全屏蔽住了原子核的正电荷, 两对电子呈现为两个带负电荷的极。在氢附近电子云密度小, 不能完全屏蔽住原子核的正电荷, 因而, 裸露出来形成两个带正电荷的极。这四个极不在一个平面上, 它们的相对位置类似于一个楔形四面体, 如图 1-1(d) 所示。从而构成了一端带正电, 另一端带负电的极性分子。

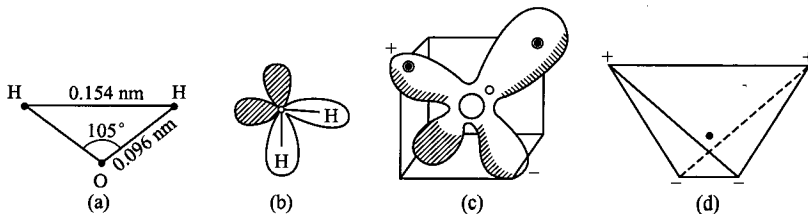


图 1-1 水分子结构示意图

(a) 等腰三角形; (b) 空间结构; (c) 电子云模型; (d) 楔形四面体

如图 1-2 所示是水的物态图或称三相图。图中表明了冰-水-蒸汽、冰-蒸汽、水-蒸汽和冰-水共存的条件。

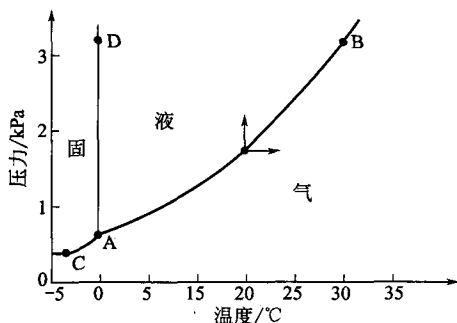


图 1-2 水的物态图

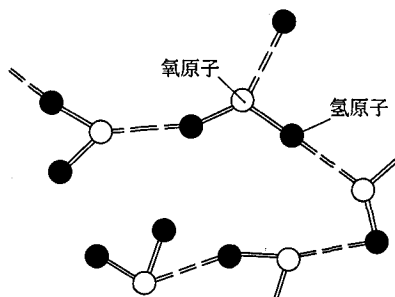


图 1-3 发生缔合的水分子结构

2. 分子的缔合作用

气态水分子（水蒸气）的结构与分子式 H_2O 完全符合，与图 1-1 相一致。液态水和固态冰由于氢键的作用而造成分子间的缔合，如图 1-3 所示即为发生缔合的水分子结构示意图。在水分子中由于氧的电负性很高，共用电子对强烈地偏向于氧原子，使氢核几乎“裸露”出来而显示出相当大的正电性，同时这种“裸露”的氢核由于体积很小，又不带内层电子，不易被其他原子的电子排斥，相反它还能吸引另一个水分子中电负性大的氧原子中的独对电子而形成氢键。

由于缔合是放热过程，所以降低温度时，水的缔合程度就增高，缔合分子数量变大。

在固态冰的结构中，氢键数目达到最高饱和值，每个分子可形成四个氢键，但每两个分子之间只存在一个氢键，这样就形成了整齐排列的六方晶系，在分子间保持较大的空隙。当冰受热融化为水时，分子热运动增强，使一部分氢键被削弱以致解体。由 0°C 的冰转化为 0°C 的水时，大约有 15% 的氢键解体；在 $20\sim 40^\circ\text{C}$ 的范围内，大约有一半左右的氢键解体；即使达到 100°C 时，也仍然有一部分氢键存在，只有在水蒸气中，分子间的氢键才完全消失呈单个气态水分子存在。

3. 水的异常特性与水分子结构的关系

水分子的异常特性可以从水分子的结构加以说明。水分子在结构上突出的特点是具有强大的极性和生成氢键的能力，这两个特性使水分子之间的作用力（即内聚力）大大增强。一般液体的内聚力多为 $2.06 \times 10^5 \sim 5.06 \times 10^5 \text{ kPa}$ ，而水的内聚力可达 $2.23 \times 10^6 \text{ kPa}$ 。在水的内聚力中氢键结合力占主要地位，因此在提高温度增强水分子的热运动时，就要摆脱分子间氢键的束缚，这样，使水的状态在发生改变时需要更多的热量。所以水的熔点和沸点比按周期表中氧族元素氧化物推算的结果要高，融解热、蒸发热也都较高，比热容也很大，因而能够贮存和释放较多的热