

951/
147

12687

中小型火力发电厂的水处理

原书缺页

第一章 概 述

1-1 火力发电厂中的水及其对安全运行的意义

水在火力发电厂中有两种主要的用处：第一种是在锅炉中用来制造过热蒸汽的，也就是说用作接受由燃料燃烧放出来的热能的工作介质，而后通过过热蒸汽的形式将这热能送到汽轮机中使其一部分变成动能；至于发电厂的发电工作最后由汽轮机所带动的发电机来完成的。所以，在这一方面水是发电厂中的一种主要工作介质。用于这一方面的水称做锅炉用水。第二种是用来凝结自汽轮机中排至凝汽器中的蒸汽，因为这样才可以使锅炉发生的蒸汽在汽轮机中做更多的功，并可回收此工作介质，这种水称做冷却水。此外，在热电中心厂中水也用作热水网中的工作介质。

锅炉用水在火力发电厂中是不断地循环着的，它的循环系统按照发电厂性质的不同而略有差别。例如图 1-1 中所示的为水在凝汽式发电厂中循环的主要线路，图 1-2 中所示的为水在供汽式热电厂中循环的主要线路。当然，实际上发电厂中的水循环系统是比较复杂的，其中常常还包括有低压加热器、高压加热器等附属设备。

这样的运行，假使没有水和汽的损失，那末就可以将一定量的水无限期地利用。但实际上，在各种热力设备中免不了有水和汽的损失。象图 1-1、图 1-2 所指出的，在凝汽式发电厂中，锅炉发生的蒸汽是全部送至汽轮机，自汽轮机出来的蒸汽又是全部导至凝汽器的。

主要是锅炉排污及蒸汽和水通过

电厂中，水的损失量不大，

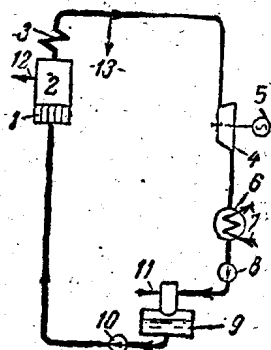
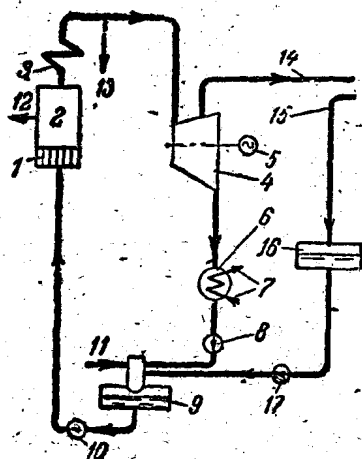


图1-1 凝汽式发电厂的水循环线路

1—省煤器；2—锅炉；3—过热器；4—汽轮机；5—发电机；6—凝汽器；7—冷却水进口和出口；8—凝结水泵；9—热式除气器；10—给水泵；11—补水进口；12—锅炉排污；13—蒸汽和水通过系统不严密部分的厂内损失。



1-2 供汽式热电厂的水循环线路

1—省煤器；2—锅炉；3—过热器；4—汽轮机；5—发电机；6—凝汽器；7—冷却水进口和出口；8—凝结水泵；9—热式除气器；10—给水泵；11—补水进口；12—锅炉排污；13—蒸汽和水通过不严密部分的厂内损失；14—至生产部门的蒸汽；15—生产部门返回的凝结水；16—收集生产部门的凝结水的水槽；17—压送生产部门的凝结水的水泵。

情况。

在发电厂中如何回收蒸汽凝结水和防止汽水损失的问题是很重要的。因为一般地来说，蒸汽凝结水中所含的杂质量非常少，所以它是最好的锅炉用水。假使能够大量地回收蒸汽凝结水，那末用来补充的水的需要量就可减少，因此水处理和水技术规范的问题也都可以简化了。

在蒸汽动力设备中，水和汽所以会引起危害，主要是因为其中沾有杂质的关系。所以水的品质就是指水中沾有的杂质而言，特别是那些危害性较大的杂质。在火力发电厂中，水质的好坏是蒸汽动力设备安全和经济运行的重要环节，因为在蒸汽动力

的每一个設備中几乎都有水或蒸汽运行着。水质不良可能引起下列后果:

1)結垢 在鍋炉、热交換器等設備中,由于鍋炉内部理化过程而使杂质析出并呈固态附着在和水相接触的受热面上的现象,叫做結垢。这种固态附着物称为水垢。

生成在蒸汽动力設備中的水垢,会降低此設備的傳热效率,因此能产生一系列由于傳热不良而引起的害处,例如热損失加大、設備的出力降低,假使水垢是結在鍋炉中的,那末会使炉管过热和鼓包,最后还可能严重到发生爆炸。生成在凝汽器中的水垢会使它的真空恶化,因而使汽輪机的效率降低。其次,为了要清除这些水垢,当然还必须停止运行,因而降低了机組的实际利用小时。

2)蒸汽通路中鹽类附着物的生成 在火力发电厂中蒸汽不洁也是很危险的,它会促使蒸汽过道的各个部分,例如过热器中、蒸汽导管中和汽輪机蒸汽流通部分生成鹽类附着物。而且蒸汽中的鹽类还特别易于附着在接近关闭机件的地方和汽輪机汽門附近,因而使它們操作困难关闭不严密。

堆积在过热汽管中的附着物,会使蒸汽过热温度降低,同时会升高过热汽管壁的温度。严重的会使个别过热汽管堵塞、鼓包和爆破。堆积在汽輪机叶片上的附着物会降低其出力,并使其运行不正常。

3)热力設備的腐蝕 在蒸汽动力設備中,水和蒸汽通路的任何地方,都可能因水中的杂质而发生金屬腐蝕的现象,例如在鍋炉、省煤器、汽輪机凝汽器、給水和热化用的管路,以至水淨化設備中。

这里必須強調指出,在热力設備中这些故障往往是彼此相牽連的。譬如說当給水管路中发生了腐蝕,那末附屬产物帶到鍋炉中时可能会引起水垢。

由此可知,在現代的火力发电厂中,为了要求它能經濟地而且長期地安全运行,必須十分重視水处理的工作。我們必須要將水

中有害于设备的杂质除去，将设备内的水质校正至不会发生故障的情况，并且要在运行中进行不间断的化学监督以保证安全运行。

1-2 火力发电厂中水的分类

火力发电厂中的水，按其所处部位的不同，可区分为：原水、补给水、给水、凝结水、炉水、排污水、化学净化水、蒸馏水和冷却水等。

原水是进入水处理设备的水，取自供给的水源。

补给水是用来补充炉水、蒸汽和凝结水等的损失的水。

给水是用来供给锅炉、蒸发器和蒸汽发生器的水。

凝结水是在汽轮机中做过功的蒸汽凝结成的水。

炉水是当锅炉运行时处在此锅炉中的水。蒸发器和蒸汽发生器中的炉水通常称为浓缩液。

排污水是当锅炉排污时，在其中放出的水。

化学净化水是在化学净化设备中经过处理后的出水。

蒸馏水是蒸发器中蒸馏出的水。

冷却水是用来凝结汽轮机中放出的蒸汽的水。有时，因限于水源的关系，冷却水是在冷水塔或喷水池中循环着的，这样的水又叫做循环水。

此外，在发电厂中尚有用来逆洗过滤器和离子交换器的逆洗水、出自过滤器中的过滤水、通过阳离子交换器或其他软化设备后的软化水等等。

这些水因所经过的过程不同，所以各有不同的特点，这在本书的后面可以明显地看出来的。

1-3 水 溶 液

水中的杂质按其和水混合形态的不同可分为三类：

1)粗分散杂质 这些是呈较大颗粒状悬浮在水中的物质，大的可以用肉眼分辨出来，小的可以用显微镜来看。它们会在水静置时自行沉下，颗粒大和比重大的沉得快，反之就沉得慢。有些

微小的粗分散物需要很長的时期才会自行沉下。这一种状态称做粗分散状态，在天然水中呈粗分散状态的杂质有粘土的微粒、沙的微粒和植物的遗体等。

2) 膠体溶液 有些物質在水中成較小的微粒形态，但它們还不是呈分子状态，而是許多分子集成成的个体，这种物質称为膠体。膠体微粒均帶有电荷，因此在許多膠粒之間由于同性电相斥的关系，彼此不会結合在一起。所以膠体溶液不論放置多久，其中膠体不会自行沉澱的。在水中常常成膠体溶液的有硅、鉄、鋁的化合物和若干有机物等。

3) 眞溶液 这是杂质的分子和水分子互相均匀混合的体系。这一种杂质不能用任何显微鏡看出，也不能用任何濾紙濾去。眞溶液有时簡称溶液。如氧、氮、二氧化碳等气体和氯化物、硫酸鹽、碳酸鹽等矿物質在水中都成眞溶液状态。

概略地说，这三种体系可以象以下这样来区分：粗分散的物質可以用各种過濾法除去，膠体要用凝聚法才能除去，至于眞溶液就必須要用化学法將它們轉变成另一种难溶化合物才能除去。

水是一种溶解力很强的溶剂。它可以溶解許多固态、液态和气态的物質。对于我們所研究的这一个問題來說，最重要的是气体和固体的水溶液。

各种物質在水中的溶解性有很大的差別。有些液体可以无限制地溶解在水中，如乙醇(酒精)、醋酸等，但絕大多數的固体和气体，当一定的狀況下，在水中有一定的溶解极限。假使达到了此极限，再加入該物質时，它就不能再溶解而要沉澱出来。这种溶液称为飽和溶液。在此一定的条件下，物質溶在定量水中达极限时的重量，叫做溶解度。

溶解度一般是用100克水中所能溶解的該物質的克数来表示的，有时对于溶解度較大的用百分率表示，較小的用1公斤水中的毫克数来表示。物質的溶解度要受温度的影响，有些是随温度的上升而加大，也有些是因温度上升而降低。今將水中各种常見物質的溶解度和温度的关系列于图1-3和图1-4。

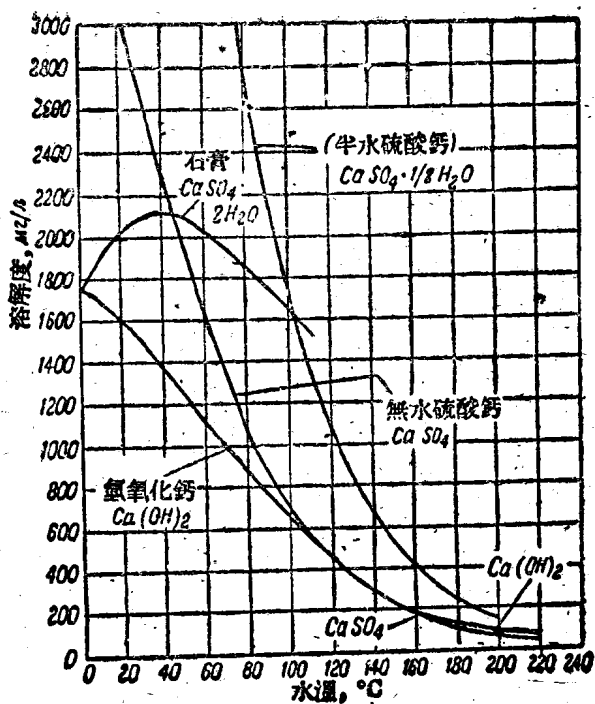


图1-3 鈣鹽的溶解度曲綫

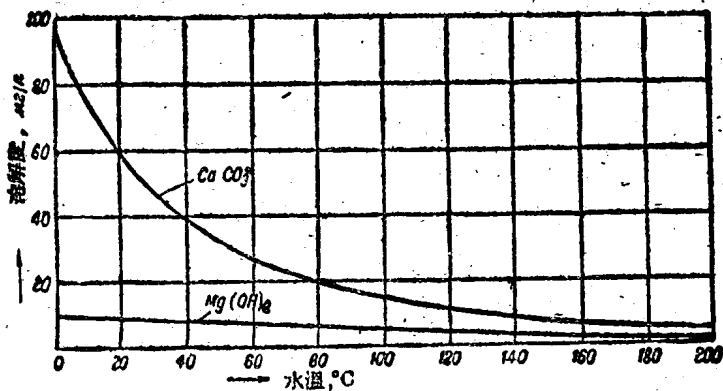


图1-4 CaCO_3 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的溶解度曲綫

至于气体在水中的溶解度，除了和此种气体的本质与温度有关外，而且还决定于和此水相接触的该种气体的压力；在一定的温度下气体的溶解度和此压力成正比(亨利定律)。气体溶解度的表示法有好几种，常用的一种称做溶解度系数，它表示在给定的温度下和当该气体的部分压力为760公厘水银柱时，能溶解在单位体积中的该气体体积(按0°C和760公厘水银柱时的体积计算)。

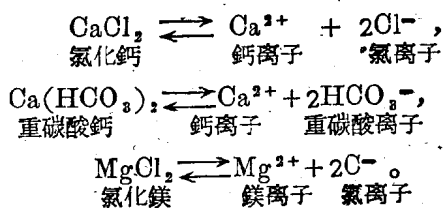
物质可以按其溶解在水中时是否具有导电性能而分成两类。其溶液具有导电性能的称做电解质，如碱、酸和盐类属之。反之称做非电解质。

天然水中含有的杂质属于电解质的较多。电解质溶液所以能导电是因为电解质是由两部分组成的。一部分带有一定量的正电荷，它叫做阳离子；另一部分带有和此量相等的负电荷，它叫做阴离子。

阴阳两种离子的结合是靠正电和负电相吸的力。当这一类物质溶解在水中时，它的分子就因为和水分子的作用而使此两种离子分离开来，呈游离状态地处在溶液中。由于这些游离状态的离子在溶液中可以自由地移动，所以这一类物质的溶液具有导电的性能。

电解质溶在水中时分成两个带电部分的作用，叫做电解或电离。阳离子所带的正电用“+”号表示，阴离子所带的负电用“-”号表示。

例如 -



在这些反应式中，符号 $\rightleftharpoons$ 表示此化学过程是可逆的，也就是说在該溶液中除了有該物质的电离作用外，还有离子结合成分

子的反应。所以在电解质的溶液中分子和各离子之间有一种平衡反应，其结果使一部分电解质离解成离子，其余部分在溶液中仍然呈分子状态。

电解质在溶液中分裂成离子的量和其全体的比称做离解率。离解率大的物质称做强电解质，离解率小的称做弱电解质。

差不多所有的盐类和大多数无机酸，以及苛性硷类(苛性钠、苛性钾)，都属于强电解质；而有机酸和有机硷，以及其他一些无机酸(碳酸、铬酸)和无机硷(氨)是属于弱电解质。

离解率除了和温度有关外，还和其浓度有关。一般来说，电解质的浓度愈小，其分子的离解率愈大。所以在非常稀的溶液中，各种电解质都近于完全离解。

1-4 水的品质及其指标

上面已经说过，水的品质是指水中沾有杂质的情况。水的溶解性很强，所以水中的杂质是多种多样的。因此水的品质不能只采用一种指标来表示，而必须根据该种水的特点和分析此水的目的，用几种或更多种指标来指示。就火力发电厂的用水来说，主要的指标是悬浮物、含盐量、硬度、碱度、耗氧量、氢离子浓度、溶解氧、游离二氧化碳、铝和铁的化合物，以及阳离子钙、镁和钠，阴离子氯、硫酸根、磷酸根和碳酸根等的含量。

在这些指标中的开头五种称做技术指标，因为它们不是表示水中某一样单独的化合物或离子，而是指水中具有某一共同特性的一类物质。

在这些指标中，阳离子、阴离子和某些技术指标(如硬度和碱度)的浓度单位是毫克当量/公升，即在一公升溶液中含有该物质或该类物质的毫克当量数；对于微量的浓度可以采用只有此单位千分之一大小的微克当量/公升来表示，

$$1 \text{ 毫克当量/公升} = 1,000 \text{ 微克当量/公升。}$$

以前，上述这两种技术指标常常用度数来表示(或称德国度，符号°H)。凡一公升水中含有这些物质的总量相当于10毫克氧化

鈣(CaO)时称为1度, 这里所說“相当于”是指当量相等。所以这两种單位的关系如下:

1毫克当量/公升 = 28毫克CaO/公升 = 2.8×10 毫克CaO/公升 = 2.8°H 。

今將各种單位的換算法列于表1-1中。

所用符号: g ——当量。

表1-1 各种單位的換算法

已知濃度	所 求 的 濃 度		
	毫克/公升	$^\circ\text{H}$	毫克当量/公升
C_B 毫克/公升	—	$C_H = \frac{2.8 \times C_B}{9}$	$C_g = \frac{C_B}{9}$
C_H $^\circ\text{H}$	$C_B = \frac{9 \times C_H}{2.8}$	—	$\frac{C_H}{2.8}$
C_g 毫克当量/公升	$C_B = 9 \times C_g$	$C_H = 2.8 \times C_g$	—

举例, 由分析得知某种水中含 Ca^{2+} 23毫克/公升, Mg^{2+} 9 毫克/公升。則当用以前的德国度單位 C_H 表示时,

按公式 $C_H = \frac{2.8 \times C_g}{9}$ 算得其硬度为

$$\frac{2.8 \times 23}{20} + \frac{2.8 \times 9}{12.2} = 5.30^\circ\text{H};$$

鈣硬 鎂硬 全硬

如以毫克当量/公升表示, 用公式 $C_g = \frac{C_H}{9}$ 算得其硬度为

$$\frac{2.3}{20} + \frac{9}{12.2} = 1.89 \text{ 毫克当量/公升,}$$

或根据 C_H 来換算, $C_g = \frac{C_H}{2.8} = \frac{5.30}{2.8} = 1.89$ 毫克当量/公升。

此外, 有些指标是用毫克/公升来表示的, 如悬浮物、含鹽量、溶解氧、游离二氧化碳、鋁和鉄的化合物等。今將某些指标

的意义叙述在下面。

1) 悬浮物为在水中由于水的流动而成悬浮状态存在的粗分散物质。其测定法为用过滤器过滤，而后将带有滤出物的过滤器在 110°C 时干燥至恒重，此时过滤器所增加的重量即为水中悬浮物。此指标的單位是毫克/公升。

水的透明度是表示水中含有的各种不溶解物质，它通常以通过它还能看到某一标记(标准铅字、“十字”或“环”)的水柱的高度来表示。用透明度不能求悬浮物的量，因为它除了和悬浮物的量有关外，且和其颗粒的大小有关。

2) 含鹽量是指水中含有各种鹽类的总量；它可以按水中含有的阳离子和阴离子来计算，故其單位可以采用毫克当量/公升或毫克/公升。但实际上因为做这样的全分析太繁重，所以常采用别种近似的指标。这些指标如蒸发残渣和电导度。

蒸发残渣是指在通过过滤器的水中含有的在 110°C 时不蒸发而残留的全部杂质。所以它表示水中除气体外的溶解和胶状无机物，以及一部分当滤液在 110°C 时蒸发至恒重时也残留的有机物。此指标的單位是毫克/公升。

假使将蒸发残渣在 800°C 时灼烧，那末所得的残留物称做蒸发残渣的灼烧余量，它约相当于蒸发残渣中的无机物，其重量减轻部分约相当于有机部分。

前面已经谈到，当电解质溶于水时，此水就具有导电的性能，所以水的电导度的大小可以概略地表示水中鹽类的多少。但由于各种电解质导电性的强弱不同，所以根据电导度不能计算实际含鹽量。电导度的單位可以用微莫(1微莫 = 10^{-3} 欧姆 $^{-1}$)，也可用相对單位来表示，即以具有同等电导度的 NaCl 水溶液的浓度来表示。

3) 硬度是指水中鈣鹽和鎂鹽当量的总和而言。因为在大多数情况下，結垢的原因主要是由于这两种鹽类的关系，所以这一个指标在水处理技术中佔有很重要的地位。

水中的硬度，可按其阳离子的不同分做鈣硬和鎂硬，也可按

其阴离子分做碳酸鹽硬度和非碳酸鹽硬度。碳酸鹽硬度是鈣、鎂的重碳酸鹽和碳酸鹽的总和。但实际上因为鈣、鎂的碳酸鹽在水中的溶解度很小，所以碳酸鹽硬度主要是重碳酸鹽。非碳酸鹽硬度为除碳酸鹽硬度以外的其他硬度，它等于全硬度和碳酸鹽硬度之差。

此外，有时还将硬度分做暂时硬度和永久硬度两种。暂时硬度是指当此水在大气压下煮沸一定时间后，其硬度降低的部分；永久硬度是在这种情况下水中还保留着的硬度部分。在水煮沸过程中，其硬度的降低主要是由于其中重碳酸鹽分解成难溶鹽类而沉澱的关系，所以暂时硬度接近于碳酸鹽硬度。

4) 碱度是水中含有的氢氧根、碳酸根、重碳酸根、磷酸根和水中其他弱酸的阴离子的总和。这些阴离子和碱金属或碱土金属的化合物溶在水中时，都会使水呈碱性反应。

所以碱度可以按其阴离子的不同而分做氢氧根碱度、碳酸鹽碱度、重碳酸鹽碱度等等。碱度的单位和硬度一样。

5) 耗氧量是用来鑑定水中有机物含量的一种指标。它是在一定的条件下(水中加过剩的过锰酸钾煮沸10分钟)氧化水中有机物所消耗的过锰酸钾量。这一种耗氧量又称做过锰酸钾的耗氧量。因为现在还有一种全耗氧量，它是指将有机物完全氧化(即氧化成 H_2O 和 CO_2)所消耗的氧化剂量。

耗氧量的单位是 $KMnO_4$ 的毫克/公升^①。

但是耗氧量不能用来计算有机物的量，因为不同的有机物所消耗的氧化剂量不完全相同。所以它只能相对地指示出有机物的多少。

6) 氢离子浓度是水的一种重要的指标。经化学处理纯的水是非常弱的电解质。在 $18^\circ C$ 时，10,000,000水分子中只有一个离解成离子(见反应式1-3)。所以水的氢离子浓度实际上完全决定于其中含有的杂质。

① 以前耗氧量常常用O的毫克来表示，现在因为知道氧化有机物的氧化剂是 Mn^{7+} 而不是O，所以已不用这种方法表示。

在酸的溶液中，由于其离解而产生氢离子，所以溶液呈酸性；在强酸和弱硷所形成的鹽类溶液中，由于其水解而产生强酸和弱硷，所以溶液也成酸性。反之，在碱和弱酸强硷所形成的鹽类的溶液中，水就呈碱性。

为了書写方便，氢离子濃度($[H^+]$)^①我們常用其倒数的对

表1-2

水品質的指标、符号及單位

水品質的指标	符 号	單 位
悬 浮	—	毫克/公升
透 明 度	—	公分
含 鹽 量	—	毫克当量/公升或毫克/公升
蒸 发 残 渣	—	毫克/公升
电 导 度	—	毫克/公升 NaCl
碱 度	III	毫克当量/公升或微克当量/公升
全 硬 度	Σ_{CO_3}	毫克当量/公升或微克当量/公升
碳酸鹽硬度	Σ_K	毫克当量/公升
非碳酸鹽硬度	Σ_{HKK}	毫克当量/公升
重 碳 酸 根	HCO_3^-	毫克当量/公升
碳 酸 根	CO_3^{2-}	毫克当量/公升
磷 酸 根	PO_4^{3-}	毫克当量/公升或毫克/公升
硅 酸 根	SiO_2 或 SiO_3^{2-}	毫克/公升
硫 酸 根	SO_4^{2-}	毫克当量/公升或毫克/公升
氯 离 子	Cl^-	毫克当量/公升
鈣	Ca^{2+}	毫克当量/公升
鎂	Mg^{2+}	毫克当量/公升
鉀	K^+	毫克当量/公升
鈉	Na^+	毫克当量/公升
銨	NH_4^+	毫克/公升
鉄	Fe^{3+} 或 Fe^{2+}	毫克/公升
鋁	Al^{3+}	毫克/公升
游离二氧化碳	CO_2	毫克/公升
pH	—	—
溶 解 氧	O_2	毫克/公升
耗 氧	—	毫克/公升 $KMnO_4$

① 在〔 〕内写着某一个化学式表示它的克分子或克离子濃度。

数(即负指数)来表示, 它称做pH,

$$\text{pH} = \lg \frac{1}{[\text{H}^+]}. \quad (1-1)$$

同理, OH^- 浓度($[\text{OH}^-]$)的负指数称做pOH

$$\text{pOH} = \lg \frac{1}{[\text{OH}^-]}. \quad (1-2)$$

在一定温度下, 水中的氢离子浓度和氢氧根浓度的乘积是常数, 它称做水的离解常数。根据以上所讲的, 可知当 18°C 时水的离解常数为



$$[\text{H}^+][\text{OH}^-] = 10^{-7} \times 10^{-7} = 10^{-14},$$

也就是说 $\text{pH} + \text{pOH} = 14$;

所以纯水的 $\text{pH} = 7$, 当 $\text{pH} < 7$ 时, 氢离子的浓度大于氢氧根的浓度, 此水呈酸性反应, 反之 $\text{pH} > 7$ 时呈碱性反应。

表1-2中所示的为水和蒸汽各种基本指标的名称、符号和常用单位。

1-5 天然水

水是地壳上最多的一种物质。洋、海、湖和河流中有着大量的水, 此外还有蕴藏量仅次于洋和海的地下水, 以及大气中的水分。

自然界中的水, 在太阳辐射能的作用下, 如图 1-5 所示成循环运动。因此天然水可根据其来源的不同区分如下:

- 1) 大气水, 如雨和雪;
- 2) 地下水, 如井水和泉水;
- 3) 地面水, 如小溪、河流和淡水湖的水;
- 4) 海水, 如洋、海和鹹水湖的水。

大气水是最纯粹的天然水。大气水的硬度不会超过 $70 \sim 100$ 微克当量/公升, 其蒸发残渣在 $40 \sim 50$ 毫克/公升之间。此外, 其中还溶有空气和二氧化碳及少量悬浮物质(碳尘等)。

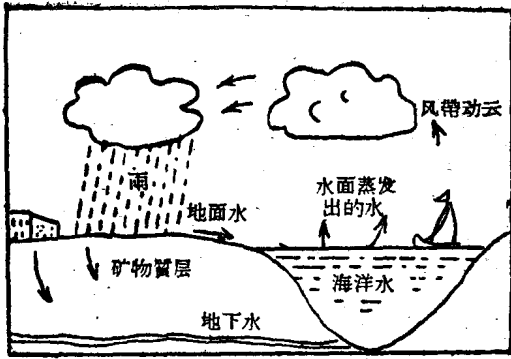
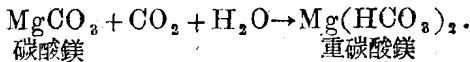
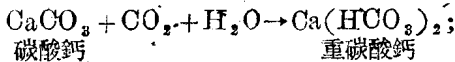


图1-5 水在自然界中的循环

这种水虽然品质很好，但由于很难大量收集，所以不能用作火力发电厂的供水。

地下水由于它通过了泥土层，这泥土层正好起了过滤作用，所以它实际上不含悬浮物。但它含的矿物质较多，这是因为当它通过泥土时溶解了其中一部分矿物质的关系。

在这种溶解过程中，水中游离二氧化碳的作用是很大的。当水通过泥土的上层时，首先吸收了其中由于植物和动物腐败所分解出来的产物，其中包括二氧化碳。而后，当它通过白垩(CaCO_3)或白云石($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$)土层时，由于以下的反应，就将这些原来是不易溶解的物质转变成易溶物质而溶解了：



所以地下水的特点是完全没有悬浮物，但根据当地土质的不同，含有或多或少的矿物质。

地下水的含盐量在100至5,000毫克/公升之间，在某些情况下，还会更高些。硬度通常在2至10~25毫克当量/公升之间。它的特点是终年的变动很小。