

本书首先介绍天然水中杂质和这些杂质对发电厂热力设备运行的影响。其次介绍水质指标、水质标准、水质形成的原因、过程和防止方法,以及水质标准上的要求。再次介绍水质指标。其次叙述锅炉的给水补充水的各种处理方法,如沉淀处理、镁剂除硅、离子交换软化、化学除氧等。最后介绍水质标准,并讨论了水处理系统中主要设备的结构和运行方法,以及水质处理效果。

本书可作为各高等工业院校热工专业水处理课程的教材。内容着重基础理论、基本知识,各处理方法的特点和使用条件。关于水处理系统设计方面的内容较少,可根据教学需要适当补充。

热力发电厂水处理

清华大学动力机械系热工工程教研室编

*

水利电力部办公厅图书编辑室编 (北京)

中国工业出版社出版 (北京修睦街丙10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $6^{1/2}$ ·字数155,000

1961年8月北京第一版·1962年4月北京第三次印刷

印数1,598—3,287·定价(10-5) 0.83元

*

统一书号: K15165·902 (水电-132)

15716

“热力发电厂水处理”勘誤表

頁	行	誤	正
6	35	…两部分水进行…	…两部分水质进行…
10	表內第3行	所有离子和分子溶解物之和,近似等于…	所有离子和分子溶解物之和。
10	表內第4行	O·C 与 M·C 之差。	近似等于 O·C 与 M·C 之差。
11	倒3行	HCO ³	HCO ₃ ⁻
12	9	或微毫克当量…	或微克当量…
13	12	…对发电厂水处理设备…	…对发电厂水处理设备…
13	14	…地下水甚不受…	…地下水甚至不受…
15	20	(Cu ₁₀ (OH) ₂ (PO ₄) ₆)	[Ca ₁₀ (OH) ₂ (PO ₄) ₆]
16	倒9行	…促进设备小金属部分腐蚀。	…促进设备金属部分的腐蚀。
21	1	…而影响设备,	…而影响设备运行,
24	7	显著(图4—4),但在…	显著,但在…
32	第18、19、25、32、33行	熔	溶
33	第2、4、12、14行		
32	第28、29行	YSiO ₃	YSiO ₃
35	第28、29行	另外炉水水位高度也与蒸汽带盐有关…	炉水中含有的汽泡数量增多,结果使…
35	倒4行	$h_{kb}^{CT} = h_{kb}^{\delta} \frac{\gamma_{CH}}{\gamma_l}$	$h_{kb}^{CT} = h_{kb}^{\delta} \frac{\gamma_{CM}}{\gamma_l}$
37	23	…即称为炉水界含盐量(S _{кв} ^{КР})	…即称为炉水临界含盐量(S _{кв} ^{КР})
47	表6—3內4	所有的鍋爐不进行清洗。	蒸汽不进行泡沫清洗。
48	2	…凝汽式电厂为或供热电厂…	…凝汽式电厂或供热电厂…
53	1	中判备。图7—5 水力…	中制备,图 7—5 为水力…
57	倒11行	…箱形配水器。	…箱形配水器分流示意图。
57	图8—1	配水器	配水器分流示意图
59	11	…加药器的准确性,	…加药的准确性,
61	15	<i>h_{в.с}</i>	<i>h_в</i>
61	22、23	η_{OT}	η_{OT}
65	6	…最大的硅酸,压力再高时,氢	…最大的是硅酸,压力再高时,首先氢…
65	倒10行	<i>q_H</i>	pH
66	倒5行	CaO·MgO	CaO/MgO
72	10	…聚氯乙烯塑或	…聚氯乙烯塑料或
75	20	$Q_{HT} = \tau_{\phi} U_{\phi} f \phi \left(\frac{24 - n_{\phi} \tau_{\phi}}{24} \right)$	$Q_{HT} = Z_{\phi} U_{\phi} f \phi \left(\frac{24 - n_{\phi} \tau_{\phi}}{24} \right)$
83	24、27、30	CHCO ₃ ⁻	CHCO ₃ ⁻
85	倒11行	SO	So
94	倒7行	NI	Na ⁺

13716
高等学校交流讲义

热力发电厂水处理

清华大学动力机械系热电工程教研组编

只限学校内部使用



中国工业出版社

目 录

第一章 緒論.....	5	第三节 汽水质量的計算标准.....	46
第一节 火力发电厂水处理的重要性.....	5	第七章 凝聚.....	49
第二节 火力发电厂的汽水循环.....	5	第一节 凝聚处理的机理.....	49
第二章 天然水源及其性质.....	8	第二节 凝聚处理的系統及设备.....	51
第一节 天然水中的杂质及其来源.....	8	第八章 沉淀处理.....	54
第二节 水质指标.....	10	第一节 沉淀处理的反应过程和葯剂消耗量.....	54
第三节 发电厂水源的种类和性质.....	12	第二节 沉淀处理设备.....	57
第三章 水垢和水渣.....	14	第三节 沉淀处理系統.....	62
第一节 水垢和水渣的形成.....	14	第四节 沉淀处理设备的运行.....	63
第二节 水垢和水渣的成分、性质及其危害性.....	15	第九章 鍍剂除硅.....	65
第三节 防止結垢的方法.....	17	第一节 鍍剂除硅的机理.....	65
第四节 鍋炉水垢的清除.....	20	第二节 鍍剂除硅的技术条件.....	66
第四章 腐蝕.....	20	第十章 水的澄清过滤.....	70
第一节 热力设备的腐蝕形式及其危害性.....	20	第一节 过滤过程的机理.....	70
第二节 电化学腐蝕理論.....	21	第二节 过滤器和过滤材料.....	70
第三节 影响腐蝕速度的因素.....	22	第三节 过滤过程的强化.....	73
第四节 給水管道的腐蝕.....	25	第十一章 阳离子交换处理.....	76
第五节 鍋炉本体的腐蝕.....	26	第一节 阳离子交换的机理.....	76
第六节 凝汽器的腐蝕及其防止.....	29	第二节 阳离子交换剂及其工艺特性.....	78
第七节 除气.....	29	第三节 阳离子交换器的构造.....	79
第五章 蒸汽的污染.....	32	第四节 阳离子交换器的运行.....	81
第一节 蒸汽污染的根源.....	32	第五节 阳离子交换处理系統及处理效果.....	84
第二节 鍋炉結構与負荷对蒸汽携带水分的影响.....	33	第十二章 水的化学除盐.....	87
第三节 炉水成分对蒸汽携带水分的影响.....	36	第一节 除盐对高参数鍋炉和直流鍋炉的意义.....	87
第四节 鍋筒內的汽水分离和蒸汽清洗.....	38	第二节 化学除盐(离子交换除盐).....	88
第五节 过热器和汽輪机的积盐及清除.....	40	第十三章 冷却水处理.....	97
第六章 发电厂的汽水质量标准.....	43	第一节 冷却水处理的必要性.....	97
第一节 发电厂汽水质量标准的重要性.....	43	第二节 防止凝汽器結垢的方法.....	98
第二节 汽水质量运行标准的确定.....	43	第三节 防止凝汽器中微生物的滋长.....	104

第一章 緒 論

第一节 火力发电厂水处理的重要性

发电厂是生产企业动力的来源，电厂的可靠运行直接关系到生产的正常进行。为此必須設法保証发电厂不間断的供电，（在热电厂中还須保証不間断地供热）。

以水作为主要工質的火力发电厂，为使动力设备——鍋炉和汽輪机正常工作，必須保証經常有一定的工質数量并需有一定需要的工質品質。水汽工質以几乎几分鐘和十几分鐘一个循环的速度周流在热力系統中，只要有短時間工質数量不足或工質品質惡化都会成为动力设备的极大危害，因而影响正常发电或供热。

保証正常水质要依靠正确对待水的淨化問題和合理的組織水质管理制度。水质不良时，会引起热力设备的三大危害，即：鍋炉受熱面的結垢，蒸汽被炉水中杂质沾污和热力设备金屬的腐蝕破坏。

在蒸汽鍋炉內产生水垢会使热烟气对炉水的傳热变坏，因而使受熱管壁溫度升高以致由于金屬强度降低而使水冷壁管和对流排管上出現鼓泡。大量結垢，特别是在水容量很大的鍋炉上，可能引起事故和炉管爆破。

除去影响运行可靠性之外，鍋炉結垢会使排烟溫度增高、过多的消耗燃料或降低鍋炉出力。汽輪机凝汽器結垢，会使凝汽器內的真空降低，因而降低热效率。

供暖加热器和火力发电厂各种类型的热交换器內結垢，会使水的加热溫度达不到設計溫度，因而不得不采用大于設計傳熱面的傳熱面积。

蒸汽动力设备結垢时，必須經常进行清洗。清洗时设备停止运行，将使运行費用大大增加，和減少设备的年利用时数。

鍋炉生产的蒸汽的純洁度，在保証火力发电厂安全可靠运行方面具有重要的意义。蒸汽由炉水中携带的杂质会在蒸汽过热器，蒸汽管路及汽輪机通汽部分沉积下来。蒸汽过热器管附着有沉淀物时，会使过热蒸汽溫度降低，同时使管壁溫度升高而超过允許范围。

經常与水汽工質接触的蒸汽动力设备的金屬，当水中含有侵蝕性杂质时即会被腐蝕，腐蝕破坏可能在汽水管道的任一个地方发生，例如鍋炉、蒸发管、省煤器，凝結水管、給水管、凝汽器、暖气管路和其它设备上都会由于水质不良发生腐蝕損坏。

因此，在现代化的火力发电厂內，特别是在高压电厂內，以及在工业企业用的大型鍋炉上，必須对汽水品質給予极大的重視。

进行正确的水处理是保証热力循环中水汽品質的關鍵，因为天然水就其本身的主要質量指标來說，在大多数情况下不經处理是不能直接送入鍋炉的。

第二节 火力发电厂的汽水循环

在近代火力发电厂中，送入鍋炉的給水是由許多来源不同的水汽汇集而成的。这些水汽經過不同的流程，具有不同的品質。其中影响最大的是經過处理的天然水，称为給水补充水。补充水中的杂质不只直接影响給水品質，而且对整个循环中各部分水汽品質有显著的影响。

补充水是为了补充汽水循环中工质损失而送入的。损失越大，补充水量愈大，带入循环的杂质也愈多，各部水汽品质所受影响也愈大。由此可见从水汽品质方面看，水处理是发电厂热力循环中不可分割的一部分。它不只需要保证一定足够的补充水量，而且更重要的需要考虑补充水对各部分水汽品质的影响。

为了监督各部分水汽质量，可通过水汽循环了解其中各部分的杂质平衡。图 1-1 为一典型的热电厂水汽循环系统图。

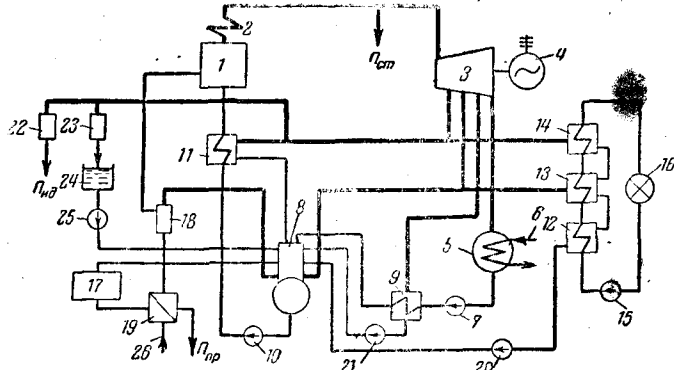


图 1-1 发电厂的汽水循环

在锅炉(1)中蒸发着的水称为炉水，由其中生产的饱和蒸汽经蒸汽过热器(2)过热后进入汽轮机(3)，蒸汽在其中把热能转变为机械功转动发电机(4)，废气则进入凝汽器(5)，在其中被冷却水(6)冷却为凝结水，用凝结水泵(7)经过低压加热器(9)送入除气器(8)中。水在除气器中再度被加热并除掉气体后，用给水泵(10)经过最后的高压加热器(11)送回锅炉中。由除气器出来的水称为给水。

除去上述主要水汽循环外，一部分工作过一半的蒸汽由汽轮机适当部分引出送入供热加热器(12、13、14)中，依靠供热水泵(15)把循环水打过供热加热器，得到的热水送到供热用户(16)作为电厂的间接热供应。

供热加热器和低压回热加热器的凝结水用水泵(20、21)打入除气器中成为给水的一部分。高压加热器的凝结水则直接流入除气器。

另一部分蒸汽由汽轮机中抽出送到生产用蒸汽用户(22、23)根据用户特点并非所有生产用汽的凝结水都能送回发电厂，其中只有部分用户(23)可以将凝结水汇集在中间水箱(24)再用水泵(25)直接送到除气器，有时当凝结水品质不良时还需要经过适当的处理才能送入汽水系统中。而另一部分凝结水(\$\Pi_{ub}\$)则不能收回。

锅炉的连续排污水经过排污扩容器(18)收回一部分蒸汽导入除气器中，浓缩后的排污水(\$\Pi_{HP}\$)经过生水加热器(19)被冷却到低温后排到污水沟中。

为了补充厂内各设备和管道的汽水损失(\$\Pi_{cr}\$)、锅炉排污水损失、不能回收的生产用汽损失必须有一定量补充水送入汽水系统中。这部分水是由生水(或称原水)经过生水加热器(19)加热后再经过水处理设备(17)处理后送入除气器的。由此可见构成给水的水流有汽轮机凝结水、供热凝结水、回热加热器凝结水、生产用汽凝结水和补充水，其中除回热加热器凝结水外，所有其他水流都会沾污给水使其品质恶化，尤其是化学处理补充水和生产用汽凝结水更为严重。为此需要对此两部分水进行控制，采用适当的处理方法使其满足给水质量的要求。

补充水量经常是以给水流量的百分数表示的：

$$\alpha_6 = \frac{Q_6}{D_{ub}} 100\%$$

式中: α_6 ——补充水率%

Q_6 ——每小时的补充水量(吨/时或立方米/时)

D_{ns} ——給水量(吨/时或立方米/时)

如果认为送入除气器的各种凝結水的杂质含量很小可以略而不計, 則离开除气器的給水中的杂质主要是补充水带进的。此时除气器中的杂质平衡可以近似的表示为下式:

$$Q_6 \cdot S_6 \approx D_{ns} \cdot S_{ns}$$

或

$$S_{ns} \approx \frac{Q_6}{D_{ns}} \cdot S_6 = \frac{\alpha_6}{100} S_6 \text{ (毫克/升)}$$

式中: S_6, S_{ns} ——补充水与給水中杂质的含量(毫克/升)。

給水中的杂质含量愈大, 則炉水的濃度也愈大, 因而也就愈影响蒸汽的純度。为此需要設法降低給水中杂质的含量。首先应当减小补充水率 α_6 , 即减小各部分汽水損失; 其次应当减小补充水的杂质含量, 即采取各种有效的水处理措施; 最后可以用組織各种有效的鍋内过程办法, 使在炉水濃度較高的情况下保証蒸汽的品質。

凝結水(除去回热加热器凝結水以外)有时也会被冷却水沾污, 尤其是汽輪机凝結水在凝汽器結構不严密时, 少量的冷却水滲进凝結水中都会使其杂质含量增大很多, 因而影响給水品質。生产用汽凝結水也常常在工业生产过程中被沾污, 此时必須經過处理后才能送入除气器。

由上可見发电厂水处理工作除去保証供給一定品質的經過处理的补充水外, 还必须經常对热力系統中各部分汽水品質进行监督。

发电厂的水处理包括給水补充水的各种处理步骤: 即在淨水設備(如沉淀器和过滤器)中除去水中粗粒悬浮物; 在凝聚設備中除掉有机物; 在各种軟化設備中除去鈣和鎂离子; 在中和設備内降低水的碱量; 在除硅設備内除掉危害高压鍋炉的硅酸盐类; 在除盐設備内部分除掉或彻底除掉水中的盐类以及在除气設備中除掉水中的气体, 在除油設備中除掉生产用汽凝結水中的油質。

为了保証鍋炉本体不結水垢和防止腐蝕, 还需要在鍋炉中进行内处理和控制在鍋炉水中各种杂质的含量, 管理正常的排污制度, 規定和监督各部汽水的运行質量指标, 以及对已結水垢、积盐和发生腐蝕的設备和管道采取清除、清洗和預防消除等等有效措施。

第二章 天然水源及其性质

发电厂的用水，都是取之于自然水源。这种水称为天然水。天然水的性质直接影响各处理阶段的原水和最后的处理水的质量，因而也就影响水处理的工艺过程和热力设备用水的情况。所以在选用天然水源时，需要考虑其水质问题。

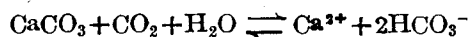
天然水源有地面水、地下水、雨水和海水。江河、湖泊等为地面水源。泉水与井水为地下水源。以雨水作为原水的发电厂较少，只有干旱地区，水源缺少时，才设法蓄积雨水做为厂用原水。

第一节 天然水中的杂质及其来源

一般天然水都含有许多杂质，从作为发电厂原水来看其中主要杂质分三大类：

(一) 以分子或离子状态存在于水中的杂质。其中主要的是 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , H^+ ; Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , SiO_3^{2-} 。此外还有少量 NH_4^+ 和铁及铜的化合物。

Ca^{2+} 的来源主要是由于在水中 CO_2 的作用下石灰石的溶解：



随水中 CO_2 含量多少不同 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的含量也受影响。另一个 Ca^{2+} 的来源是石膏矿石（硫酸钙）的溶解。水中矿物质含量大时， Ca^{2+} 的含量较小，这是因为 Ca^{2+} 与其他阴离子如 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 等处于平衡状态，当这些阴离子含量大时，钙盐受溶解度的限制便由水中沉淀出来。因此含盐量小的水， Ca^{2+} 往往较多。

Mg^{2+} 的来源是由于白云石 ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) 的溶解，但其溶解度较 Ca^{2+} 大。在海水或盐湖水中 Mg^{2+} 较一般天然水中多得多。

天然水中钙和镁以分子状态存在的形式为： $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ， MgSO_4 、 MgCl_2 、 CaSO_4 、 CaCl_2 、 CaSiO_3 。其中 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 与 CaCl_2 、 CaSO_4 不常同时存在，这是由于两种盐类溶解度差异的关系。因此天然水中 Ca 和 Mg 的存在形式有两种可能的组合即：



第一种水称为镁盐硬度水（其中 $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+}$ ）；

第二种水称为 Ca 盐硬度水（其中 $\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+}$ ）。

Na^+ 的出现是由于含钠盐土壤的溶解。它是水中主要的阳离子，构成水中盐类的主要成分。其分子形式为 NaCl ， Na_2SO_4 ， Na_2SiO_3 ，有时有 NaHCO_3 。 Na^+ 含量特别多的水（如海水），则 Ca^{2+} 较少。 Na^+ 含量不止受土壤性质的影响，也受工业排水的影响。

天然水中有 H^+ 是由于二氧化碳溶解的结果：



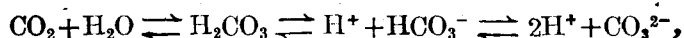
由水中除掉 CO_2 时，水的 pH 值常增大，而 H^+ 则减少。一般天然水的 pH 值在 5.5~8.5 范围内。

Cl^- 是所有天然水中必含的杂质。随地质和地区不同，其含量不定。水中 Cl^- 的相对

含量(即氯离子与总含盐量之比)比较稳定,所以常用 Cl^- 含量相对地表示含盐量。 Cl^- 和 Na^+ 是构成海水杂质的主要成分。

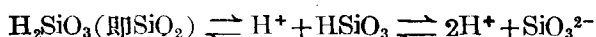
SO_4^{2-} 和 Cl^- 相同也是水中常见的杂质。主要是由于地下岩层(石膏石)的溶解。所以地下水中 SO_4^{2-} 较地面水多。

HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 是石灰石、方解石和白云石等矿物质受 CO_2 的作用溶解生成的。这些岩石在自然界分布极广因此这两种离子几乎存在于所有天然水中。 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 与水中溶解的 CO_2 处于平衡状态:



随水中 CO_2 溶解量的多少不同, HCO_3^- 与 CO_3^{2-} 含量也不同。在一般天然水的 CO_2 含量下水中主要有 HCO_3^- 。

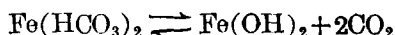
SiO_3^{2-} 的来源也是由于水溶解含硅土壤的结果;一般地下水中硅的含量较地面水多。由于硅盐的溶解度较小,含矿物质少的水中硅盐含量才较大。硅盐存在的形式有胶体状态和溶解的离子状态。以胶体状态存在的分子形式为 $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 或 $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ 。溶解状态的硅,可以是 SiO_3^{2-} 、 HSiO_3^- 和 SiO_2 三种形式。随水的 PH 值不同,胶体状态与溶解状态的硅处于平衡中,其形式可以互相转变:



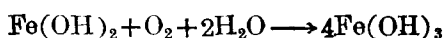
pH < 8 时,水中硅盐几乎都是 SiO_2 (H_2SiO_3), pH > 8 时,有一部分为 HSiO_3^- , pH > 11 时则几乎全部都是 HSiO_3^- , pH 更高时即有一部分成为 SiO_3^{2-} 。所以炉水中常出现 Na_2SiO_3 。炉水碱度愈大,转变为 Na_2SiO_3 的也愈多。虽然水中的硅盐含量和其他杂质比较并不大,但对高参数锅炉的蒸汽纯度影响很大。

NO_3^- , NO_2^- 和 NH_4^+ 是随工业排污水和由于有机体的分解而进入水中的。

铁化合物在水中主要是 $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ 和 FeSO_4 。地下水因为 CO_2 含量大铁离子较多。当由水中除掉 CO_2 时, $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ 即分解成为 $\text{Fe}(\text{OH})_2$:



再被氧气氧化成为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀:



这些铁化合物会沉积在锅炉中成为水垢,并能引起腐蚀(即所谓铁垢腐蚀)。

(二) 颗粒悬浮杂质和胶溶物。水中的细微颗粒杂质随其比重不同尤其是颗粒大小不同,有的成为稳定的分散相,有的则为暂时稳定分散相或不稳定分散相。杂质颗粒较水分子大的为不稳定分散相杂质,这些颗粒会渐渐下沉(当其比重较水大时)或渐渐上浮到水面(当其比重较水小时)。混有这种杂质的水称为悬浮液或乳浊液。杂质的颗粒很小比重接近水时,则成为稳定的分散相,不易由水中分出,这种分散相称为胶溶物。杂质颗粒小到接近水的分子或小于水的分子时则成为分子溶液。胶溶物的颗粒在 $1 \sim 100 m\mu$ 之间,分子或离子都小于 $1 m\mu$, 例如:

Na^+ —— $0.26 m\mu$; 酒精分子 —— $0.5 m\mu$

淀粉分子 —— $4 \sim 5 m\mu$; 胶体颗粒 —— $1 \sim 100 m\mu$

淀粉细颗粒 —— $3000 m\mu \sim 4000 m\mu$

水中的悬浮杂质有砂砾、粘土、动植物残余体,以及由土壤中冲下的杂质。地面水中

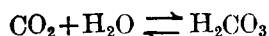
悬浮质含量较大。河水中泥沙很多，湖泊水中则多是动植物残余体。洪水时期这些杂质含量比平时更大。

胶溶物的来源有两种：一种是有机质来源，一般通称为“腐质物”，湖泊水中最多。这是由于水生植物或动物肢体的腐烂分解而生成的有机胶溶物。常常使水呈黄绿色或褐色。工业地区的水源受工业排水的污染有机杂质也很多。胶体的另一来源是矿物质，其中主要是铁、硅、铅的化合物，如 Fe_2O_3 ， $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ， Al_2O_3 等。

胶体不但妨碍水的净化，对锅炉的工作也有很大影响。

(三) 气体溶解物，主要是氧气和二氧化碳气。氧的来源是空气中氧的溶解。

水中 CO_2 的来源是有机物的氧化分解；地壳中进行的地质化学变化，以及空气中二氧化碳的溶解。 CO_2 在水中大部分呈分子状态，另一部分则与水形成碳酸，这两部分存在着平衡关系；



并与水中的 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 有关。一般水的 pH 值不大，差不多都有 CO_2 ，只有当 $\text{pH} > 8.5$ 时， CO_2 才不复存在。

氧与 CO_2 都会造成金属设备的腐蚀。

第二节 水质指标

表示天然水和发电厂内各种水中杂质数量的指标有两大类：即水质全分析指标和工业分析指标（或称运行指标）。全分析指标是将前节所述水中所有杂质的含量分别表示。这种全分析指标用于对水质作详细研究和用来设计净水设备。

全分析指标包括的内容如下：

项 目	符 号	单 位	与 其 他 项 目 的 关 系
悬浮物	—	毫克/升	
干残余量	O · C	„	
矿质含量	M · C	„	所有离子和分子溶解物之和，近似等于
有机物	A	„	O · C 与 M · C 之差。
含氧量	O_2	„	
总硬度	H_t	毫克当量/升	与 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 之和等当量。
暂时硬度	H_k	„	一般与 HCO_3^- 等当量。
碱度	III	„	对天然水与 H_k 相等。
钙离子	Ca^{2+}	毫克/升	有时用 CaO 表示
镁离子	Mg^{2+}	„	有时用 MgO 表示
钠离子	Na^+	„	有时用 Na_2O 表示
钾离子	K^+	„	有时用 K_2O 表示
氯离子	Cl	„	阴阳离子当量和应相等。
硫酸离子	SO_4^{2-}	„	
重碳酸离子	HCO_3^-	„	
硅酸离子	SiO_3^{2-}	„	包括水中溶解 SiO_2 和 H_2SiO_3
三氧化二铝	Al_2O_3	„	常用 R_2O_3 表示总量
三氧化二铁	Fe_2O_3	„	
二氧化碳	CO_2	„	
pH值	pH	—	

水源的水質常常随季节变动,此外也受周圍环境的影响。所以每一水源的全分析資料常常有几份,如春季、夏季和冬季。当周圍环境改变时(例如增設工厂、开辟水渠),也要重作一次全分析。

作全分析需要很長的时间和較大人力,所以在經常性的水質監督中不用全分析指标,而是選擇其中比較重要的指标組成所謂工业分析指标,作为运行監督的标准。工业分析指标有下列几項:

1) 透明度:表示水中悬浮物的总量。因为悬浮物在水中有阻碍光綫穿过的作用,据此可間接表示其数量。透明度的表示方法有两种。一种是鉛字透明度,即将一定尺寸的印刷鉛字放在水层下面,經过水层仍能清楚看到該鉛字时,水层的高度即为該水的透明度指标。另一种是将一毫米直徑的十字綫置于玻璃筒(筒直徑为 30 毫米,高 3.5 米)底部白色无光澤的磁盘上,向筒中注水,直到經过水层仍能看清該十字綫时,用水层厚度(厘米)表示透明度,称为十字綫透明度。这种表示水中悬浮物含量的方法,有时不很精确。最新的測定方法是利用光学仪器(如光电比色計等)測量。而最精确的办法还是全分析中測定悬浮物的重量分析法。

2) 耗氧量(氧化性):表示水中有机物的数量。水中的有机物大都有被氧化的可能。所以便用消耗于氧化这些有机物的氧气数量間接表示有机物含量。消耗于氧化每升水中有有机物的氧气的毫克数或 KMnO_4 的毫克数称为水的耗氧量。

3) 干残余量和矿質余量:二者都是表示水中杂质总量的指标,以胶体或分子溶解状态存在于水中的非挥发性物质数量称为干残余量。作干残余量的方法是将經过过滤的水样在水浴鍋上仔細蒸干,再在 $110\sim 120^\circ\text{C}$ 温度下烘干。得到为残余物对每升水而言即为干残余量。由此可見水的干残余量即是除去被滤出的悬浮物、溶解气体和揮发物质(如 NH_3) 以外的所有杂质总量。在决定干残余量时,水中原有的重碳酸盐都将变成碳酸盐。

除去干残余量外还有灼烧余量、矿質余量和硫酸盐余量三种表示全部杂质含量的指标。把决定干残余量时得到的残余物在 800°C 下灼烧,最后残余的杂质的毫克数(对每升水而言)即为灼烧余量。灼烧余量比干残余量減小的数量是由于有机物被烧掉、残留湿份的揮发、碳酸盐的部分分解以及类似过程所引起的。

矿質余量是表示每升水中以分子和离子状态溶解的杂质的毫克数。所以矿質余量包括水中所有阳阴离子以及 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 SiO_2 等含量。矿質余量需要依靠全分析数据决定或近似的由于干残余量中減掉有机物而得。

将干残余物用硫酸溶解,使所有盐类都成为硫酸盐,烘干后得到的杂质含量(对每升水而言)称为硫酸盐余量。

一般常用的指标是干残余量和矿質余量。在决定蒸汽的杂质含量时有时用硫酸盐余量。这一类指标有时統称为全固形物。是說明水質的重要指标。其单位为毫克/升或微克/升。

4) 碱度:表示水中所含有的已解离的和分子状态的氢氧化物、碳酸盐和重碳酸盐以及其他能提高水中 OH^- 濃度的碱土金属或碱金属化合物的总和。如果用离子形式表示时,对天然水來說有 HCO_3^- 、 SiO_3^{2-} 、 HSiO_3^- 和少量的 CO_3^{2-} ,其中主要是 HCO_3^- 。此外水中某些弱酸(如腐質酸)也构成水的碱度。对软化水和炉水來說,除去上述成分外还有 PO_4^{3-} 和 OH^- ,而主要的是 OH^- 和 CO_3^{2-} 。因此碱度又常常分为重酸盐碱度(III₆)、碳酸盐碱度

(III_k) 和氢氧碱度 (III_z)。总碱度则用 III_0 表示。在一般情况下:

$$\text{III}_0 \cong \text{III}_6 + \text{III}_k + \text{III}_z$$

碱度的单位用毫克当量/升 (有时用更小的单位微克当量/升即等于 1/1000 毫克当量/升) 或度来表示。

$$1 \text{ 毫克当量/升} \cong 2.8 \text{ 度}$$

5) 硬度: 硬度是专门表示水中的钙和镁的化合物数量的指标, 因为这些化合物能生成水垢和水渣, 影响设备运行的安全性和经济性。

用 H_0 表示钙和镁化合物的总量称为总硬度, 即每升水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的毫克当量数或微毫克当量数 (也可以用度为单位)。根据硬度和碱度相互关系, 天然水可以分为两类: $H_0 > \text{III}_0$ 时称为非碱性水, $H_0 < \text{III}_0$ 时称为碱性水。非碱性水是最常遇到的水源, 其硬度可分为碳酸盐硬度 H_K (钙和镁的重碳酸盐) 和非碳酸盐硬度 H_{HK} (钙镁的氯化物硫酸盐矽酸盐等), 也可分为钙盐硬度 H_{Ca} 和镁盐硬度 H_{Mg} 。其关系如下:

$$H_0 = H_K + H_{HK} = H_{Ca} + H_{Mg}$$

非碱性天然水中的 HCO_3^- 一般都是 Ca 和 Mg 的阴离子, 所以 H_K 与 III_0 相等。非碱性天然水又可按钙镁的分配情况分为钙硬水 ($\frac{H_{Ca}}{H_K} > 1$) 和镁硬水 ($\frac{H_{Ca}}{H_K} < 1$)。前者只有 $H_{HK}(\text{Mg})$ 、 $H_{HK}(\text{Ca})$ 和 $H_K(\text{Ca})$, 后者则只有 $H_{HK}(\text{Mg})$ 、 $H_K(\text{Mg})$ 和 $H_K(\text{Ca})$ 。由于溶解度的关系, $H_{HK}(\text{Ca})$ 和 $H_K(\text{Mg})$ 是不常同时存在于水中的。

碱性水中 ($H_0 < \text{III}_0$ 即 $H_0 < [\text{HCO}_3^-]$) 不存在永久硬度, 所以 H_K 和 H_{HK} 没有区分的意义。这种水自然界较少见。其硬度可以分为 H_{Ca} 和 H_{Mg} , 钙和镁盐都是重碳酸盐, 即 $H_K = H_0$ 而 $H_{HK} = 0$ 。在设计水处理设备时要考虑到除去 H_K 以外的水中多余的 HCO_3^- , 这部分多余的 HCO_3^- 一般属于 NaHCO_3 化合物, 所以 H_{HK} 不会存在。

对于软化水、炉水、凝结水和给水来说只表示总的残余硬度 (H_0)。

第三节 发电厂水源的种类和性质

热力发电厂的供水水源多为地面水, 因为这种水源取水方便, 供水量大, 在水质上也有其优点。缺少地面水源的地区, 便只有用地下水。我国西北高原地区的发电厂使用地下水源的很多。沿海地区也有用海水作水源的。同是地面水 (如河水、湖水等) 其性质也不尽相同。在设计发电厂和选择水源时必须根据电厂性质考虑水源水质的特点。

地面水以使用江河水最为普遍。江河水的水质与其源流有关。流入江河的水源有高山雪水、冰川、沼泽、雨水、雪水、地表土壤水、工业排污水和生活用排水。河水的水质则受这些源流的影响。对大多数河流来说, 其主要源流是雨水和土壤水, 因此河水成分受水文气象和季节的影响很大。流过缺少盐质的油页岩层和腐质土壤层的水中盐分较少, 但含有大量有机物和一定数量的悬浮杂质。反之流过盐层土壤的水, 则其矿质性极强。经过石灰岩层流过的水不但含盐量增大, 且其中结垢盐类占主要成分, 水的硬度增高。河水在流动过程中受自然条件的作用, 尤其是由于 CO_2 溶解量的减小, 水的硬度逐渐减低, 这是和地下水不同之点。河水受气候影响也很大, 主要是因为雨水、冰川和高山雪水对河水的稀

釋作用。气候长期干旱时，河水中杂质濃度即增大。我国南方和滨海地区的河流因降雨多，含盐較少，但泥沙和悬浮物含量大。北方則含盐較多。根据矿質濃度不同河水可以分为四类：

低矿質河水	200 毫克/升以下
中矿質河水	200~500 毫克/升
高矿質河水	500~1000 毫克/升
极高矿質河水	1000 毫克/升以上

我国河流除去西北内陆河流外多是中矿質河水，硬度、碱度和干残余量都不大。

流动的湖泊其水质特点和河水相似。不流动的湖泊和人工蓄水池的水质則除去受气候、水源（河水或泉流）影响外，还受自然蒸发的作用。蒸发越强，水中杂质濃度也越大。但其硬度的增大較含盐量慢，有时甚至减小。

地面水的水质不稳定，因而对发电厂水处理设备的設計（选择系統）和运行調整产生很大困难，必須根据季节的变化經常調整水处理设备，因而影响设备自动化的彻底实现。

地下水的水质比較稳定，不受气候条件和地面水流的影响。深层的地下水甚不受降雨的影响。因其在地下流过层土壤和岩层，水质比較清彻，悬浮物和有机物都几乎没有。但溶解的盐类很多，溶解的 CO_2 量也較大。所以水的硬度很高（一般多在3毫克当量/升以上）。使用地下水源的优点是水质无大变化，在設計水处理系統时不必考虑水质受季节、气候的影响。水处理设备的运行方式比較稳定。地下水源一般供水量都較小，常常不能满足电厂扩建的需要。

海水的特点是含矿質特別多。受河流供水影响較大的港灣近海区，水的干残余量也在8000 毫克/升上下，远洋中的海水其干残余量会达到35000~37000 毫克/升。其中的溶解物主要是 Cl^- （占55%）和 Na^+ （占30%），其次是 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 。

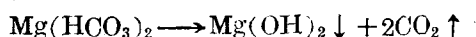
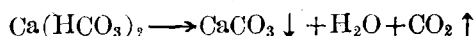
第三章 水垢和水渣

第一节 水垢和水渣的形成

电厂的热力设备运行一个时期以后，在锅炉和各种面式热交换器与水接触的管壁上都会生成一层沉淀物。由于它的成分和密度不同，有的很坚硬，称为水垢；有的是海绵状的附着物，称为水渣（或泥渣）。水垢和水渣主要是由钙和镁的盐类所组成。它的生成是因为这些物质在水中的浓度超过了它们的溶解度，于是就从溶液中沉淀下来。

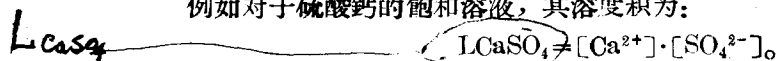
在热力设备运行过程中，水中盐类会超过其溶解度的原因如下：

- 1) 由于设备中的水受热蒸发而发生普遍浓缩的现象；
- 2) 由于在加热蒸发的过程中，水中有些物质发生热分解，结果产生了难溶的化合物。例如钙和镁的重碳酸盐当温度升高时，会分解成溶度积较小的 CaCO_3 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。



换句话说，这里进行着一种离子转变的过程，即 HCO_3^- 离子转变成 CO_3^{2-} 和 OH^- 离子。必须指出，只有当水中同时存在结垢物的阴离子和阳离子时，才有可能出现沉淀物。而其阴离子和阳离子的当量数并不一定相等，只要某种难溶化合物的阴离子和阳离子的浓度乘积大于此物质的溶度积时就会出现沉淀。所以，为了使该物质自溶液中沉出，完全不必要向炉水中加入这种化合物，而只要加入含有该化合物中的一种离子（阴离子或阳离子）的物质即可。

例如对于硫酸钙的饱和溶液，其溶度积为：



在此溶液中加入象氯化钙（ CaCl_2 ）或硫酸钠（ Na_2SO_4 ）等易溶化合物，即会使部分硫酸钙析出成为沉淀物，因为此时水中的钙离子和硫酸根离子的浓度的乘积大于它们的溶度积 L_{CaSO_4} 。

- 3) 由于某种物质的溶度积是随温度和压力的升高而降低的，它就可能在参数变动下因超过溶度积而析出。例如在低压时，硫酸钙的溶解度约为 100 毫克/公斤，而在 30 大气压时，就减少到 50 毫克/公斤。

- 4) 由于靠近受热面的一层水膜流动得较慢，在蒸发过程中，其中盐类的浓缩度较大，结果，在这一层水膜中的某些盐类数量首先超过溶度积而析出。

水中的盐类由于超过溶度积而产生的沉淀，可能是水垢也可能是水渣（泥渣）。这与多方面的因素有关。

- 1) 和沉淀物的化学成分有关，例如 CaSO_4 、 CaSiO_3 和铁、铝的硅酸盐经常会成为水垢，而 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$ （水化磷灰石）等沉淀则成为水渣。

- 2) 和形成的条件有关，当在水容积中而不是在受热面上形成沉淀时，会出现水渣而不形成水垢。例如锅炉给水直接加到正在沸腾的炉水中时，给水中的 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 分解产生的 CaCO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 就会以水渣形式沉淀下来。所以在设计锅炉的结

Mg

构时经常设法将给水直接送到沸腾的炉水中。

3) 和沉淀物的结晶形状有关, 电磁水处理的试验证明: 使水流经过垂直的磁力线作用以后, 即可改变其中结垢物质的结晶形状, 有规则的菱形变成散乱树枝形, 结果就不再形成水垢而成为水渣。

第二节 水垢和水渣的成分、性质及其危害性

锅炉和热交换器中生成的水垢有各种不同的化学成分和物理结构:

1) 碳酸盐水垢, 以碳酸钙和碳酸镁为主。碳酸盐水垢易于在省煤器、热交换器、凝气器、给水管、蒸发器和冷水塔中生成。

2) 硫酸盐水垢, 主要是硫酸钙。这种水垢特别坚硬致密, 易于在炉水高度浓缩的受热面中 (例如锅炉及蒸发器中) 生成。

3) 硅酸盐水垢, 主要是硅灰石 (CaSiO_3) 和沸石 ($5\text{CaO} \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)。这些水垢硬度很大导热系数很小, 常常在锅炉的热强度最大的表面生成。

4) 混合水垢, 它包含铁、铝和钠的氧化物, 是多种化合物组成的复杂水垢, 例如钠辉石 ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$) 钙霞石 ($4\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 4\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 等。在混合水垢中, 包含有金属腐蚀的生成物 (氧化铁) 其含量变化不定, 从 20% 到 50%。

在水渣的成分中含有碳酸钙、氢氧化镁、碳酸镁、磷酸镁 [$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$]、盐基性磷灰石 [$\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$]、氧化铁 (Fe_2O_3)、氧化铜 (CuO) 和有机物质。

在锅炉运行时生成的水渣有下面两类:

1) 松软的水渣, 不粘附在受热面上, 靠排污就能除掉。如蛇纹石 ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、水化磷灰石 ($\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$)。

2) 易粘附在受热面上并能生成难以用机械方法除掉的二次水垢的水渣。例如 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ 。

水垢的主要物理性质有孔隙度、真比重、视比重、硬度和导热性等。

水垢的真比重 (γ) 是其在 20°C 时的重量与 4°C 时同体积的水重的比值, 这里所称的体积不包括水垢中孔隙的体积。

水垢的视比重 (γ') 也是上述比值, 但这里所称的体积应包括水垢中孔隙的容积。

水垢的孔隙度是水垢中孔隙占水垢体积的百分率, 所以它可以根据真比重和视比重来计算:

$$\text{孔隙度} = \frac{\gamma - \gamma'}{\gamma} 100\%$$

孔隙度对于水垢的导热性影响很大, 孔隙度大的水垢导热系数较小。

水垢的硬度可以用来判断此水垢是否易于用机械方法 (切或刮) 除去。

水垢的导热性与锅炉的安全经济运行有关。水垢的导热系数越小, 它对锅炉传热的阻力越大, 因此也就越危险。换句话说, 为了保证安全运行, 对导热系数越小的水垢, 允许的结垢厚度也越小, 生成此种水垢时锅炉就不得常常停炉进行预防性的受热面清洗以免发生事故。

经过对各种水垢的导热系数研究, 发现水垢的导热性差不多与其成分无关 (除硅酸盐水垢和含油的水垢以外)。但和水垢的孔隙度关系很大, 孔隙度越大的水垢导热系数越