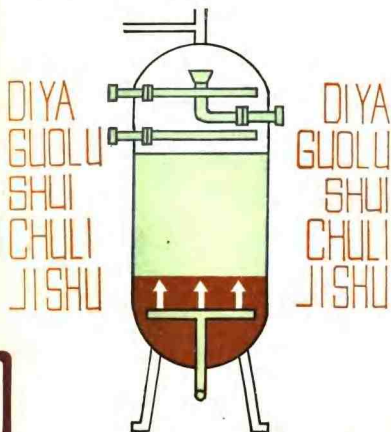


李春友 谢文国 原凤来 编

低压锅炉 水处理技术



大连理工大学出版社

内 容 提 要

本书按照国家《低压锅炉水质标准》GB1576—85的要求,结合我国现实条件,较系统的阐述了低压锅炉水处理技术。全书共10章,全面介绍了水质化验员应掌握的基础知识、锅内水处理、离子交换水处理、水质分析方法、溶液的配制和标定方法及锅炉化学除垢。书后附有附录,介绍了水处理过程中常用的技术资料。

本书可作为水质化验员的培训教材,也可作为锅炉检验员、管理、司炉、清洗人员的学习参考书。

低 压 锅 炉 水 处 理 技 术

Diyaguolu Shuichuli Jishu

李春友 谢文国 原凤来 编

大连理工大学出版社出版发行 (大连市甘井子区凌水河)

大连船舶生产服务公司印刷公司印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 10 $\frac{13}{16}$ 字数: 232千字

1990年5月第1版

1990年5月第1次印刷

印数: 0001—4000册

责任编辑: 小晶 凌子

责任校对: 言文

封面设计: 羊 戈

ISBN7-5611-0329-8/TB·12 定价: 4.10元

编 者 的 话

为了提高水处理化验员技术水平，适应技术培训工作的需要，在总结水处理培训工作经验的基础上，参考有关方面的资料编写了本教材。

编写过程中，编者结合我国国情，遵照GB1576—85标准的要求，在编写上力求结合实际、通俗易懂、简明扼要。对化学基础知识，原则是学员能参考其它书籍后能理解的基础知识不讲或少讲，对于不易理解的基础知识则做必要的阐述，力求深入浅出。

本书第一章和第二章由金州区锅检所原凤来同志编写；第三章至第六章和第十章由大连市锅炉压力容器检验研究所谢文国同志编写；第七章至第九章由大连市锅炉压力容器检验研究所李春友同志编写。全书由大连市锅炉压力容器检验研究所李正华同志与大连市金州区锅炉压力容器检验所原凤来同志审阅。在编写过程中大连市劳动局劳嘉寿同志，辽宁省劳动局李晓光同志对本书提供了很好的意见，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，不足之处在所难免，希望读者给予批评指正。

本书内容与现行标准和规范如有不符之处，应以后者为准。

编 者

1990年5月 大连

目 录

第一章 化学基本知识	1
§ 1.1 概述.....	1
§ 1.2 几个基本概念.....	1
§ 1.3 溶液的浓度.....	3
第二章 沉淀物的溶解平衡	9
§ 2.1 化学平衡.....	9
§ 2.2 沉淀物的溶解平衡.....	10
第三章 锅炉基本知识	15
§ 3.1 锅炉参数、锅炉分类及型号.....	15
§ 3.2 水、水蒸汽及水循环.....	19
§ 3.3 锅炉主要结构.....	22
第四章 锅炉用水	24
§ 4.1 天然水分类及特点.....	24
§ 4.2 天然水中的杂质.....	26
§ 4.3 水质不良对锅炉的危害.....	36
§ 4.4 工业锅炉的水质管理.....	40
§ 4.5 锅炉用水主要评价指标.....	45
§ 4.6 工业锅炉水质标准的制订.....	55
第五章 锅炉结垢、腐蚀及排污	64
§ 5.1 锅炉结垢.....	64
§ 5.2 锅炉腐蚀.....	67
§ 5.3 防止锅炉金属腐蚀的办法.....	73
§ 5.4 锅炉煮炉.....	79

§ 5.5 锅炉排污·····	81
第六章 锅内水处理 ·····	92
§ 6.1 概述·····	92
§ 6.2 锅内水处理常用药剂·····	94
§ 6.3 锅内水处理药剂配方和用量的计算·····	103
§ 6.4 锅内水处理药剂配制与使用·····	113
第七章 离子交换水处理 ·····	116
§ 7.1 离子交换剂·····	116
§ 7.2 树脂的使用、保管和污染后的处理·····	132
§ 7.3 离子交换水处理方法及特点·····	138
§ 7.4 固定床离子交换器水处理设备·····	161
§ 7.5 固定床逆流再生工艺·····	183
§ 7.6 浮动床离子交换水处理·····	194
§ 7.7 移动床与流动床·····	201
§ 7.8 水的化学除盐·····	209
§ 7.9 水处理系统防腐·····	214
第八章 水质分析方法 ·····	220
§ 8.1 一般规定和水样的采集·····	220
§ 8.2 悬浮固形物的测定·····	223
§ 8.3 溶解固形物的测定·····	226
§ 8.4 pH 的测定(比色法)·····	229
§ 8.5 氯离子的测定·····	237
§ 8.6 碱度的测定(容量法)·····	240
§ 8.7 硬度的测定(EDTA滴定法)·····	243
§ 8.8 钙、镁离子的测定·····	246
§ 8.9 磷酸盐的测定(磷钼蓝比色法)·····	248

§ 8.10 溶解氧的测定 (两瓶法)	250
§ 8.11 酸度的测定 (容量法)	253
§ 8.12 亚硫酸盐的测定 (碘量法)	254
§ 8.13 油的测定 (质量法)	256
第九章 溶液的配制和标定方法	259
§ 9.1 化学试剂、指示剂及一般规定	259
§ 9.2 普通溶液的配制	262
§ 9.3 标准溶液的配制与标定	264
第十章 锅炉化学除垢	274
§ 10.1 锅炉酸洗除垢法	274
§ 10.2 锅炉碱洗除垢法	283
附 录	
附录一 常用元素的原子量, 化合价和当量	284
附录二 常用化合物的分子量和当量	285
附录三 常用酸、碱溶液密度和浓度	286
附录四 我国化学试剂的等级和标志	287
附录五 氯化钠溶液的密度和浓度 (20°C)	287
附录六 重于水的液体密度与波美度的关系	288
附录七 钠离子交换器再生用盐量	289
附录八 水质分析常用的仪器与药品	290
附录九 试验室用离子交换树脂的准备和 超纯水制备	295
附录十 缓蚀盐酸清除低压锅炉水垢技术标准	298
附录十一 低压锅炉化学清洗规则	313

第一章 化学基本知识

§ 1.1 概 述

对于一个初级水处理技术人员经常要运用化学基本概念和定律来解决所遇到的问题。因此，为进一步系统学习水处理技术打下一定的基础，有必要有选择地讲解或复习一下水处理技术中涉及到的一些化学基本概念、定律及其有关计算。

§ 1.2 几个基本概念

一、分子 原子 离子

1. 分子是保持物质化学性质的一种微粒。
2. 原子是物质进行化学反应的基本微粒。
3. 离子是在一定的条件下原子或原子团失去或得到一部分电子而成为带电荷的微粒。失去电子后成为带正电荷的微粒称为阳离子；得到电子后成为带负电荷的微粒，称为阴离子。写离子符号时，要在元素符号的右上角注明其所带电荷数。例如，钙离子写成 Ca^{2+} ；硫酸根离子写成 SO_4^{2-} 。

二、元素 核素 同位素

元素——具有相同核电荷数（即原子核内的质子数）的同一类原子的总称。元素是以核电荷为标准对原子进行分类的。因此，原子的核电荷数是决定元素性质的关键。

核素——具有一定数目的质子和一定数目中子的一种原

子，例如，碳元素有C-12、C-13和C-14三种核素。

同位素——质子数相同，而中子数不同的同一元素的不同原子互称为同位素，即多核素元素中的不同核素互称为同位素。

要注意的是：

(1) 不要把元素、原子、单质的概念混淆在一起。元素是以核电荷为标准进行分类的，元素是核电荷相同的一类原子的总称；单质是元素存在的一种形式；原子是以单质和化合物的形式存在的。

(2) 核素有多核素和单一核素元素之分；在核素中，不仅存在着质子数相同，质量数不同的同位素，而且存在着质量数相同，质子数不同的同量数，例如 $^{65}_{29}\text{Cu}$ 和 $^{65}_{30}\text{Zn}$ 。

(3) 原子序数不仅代表着原子的某种性质，还代表元素在周期表中的位置，它是原子性质的基本参数。

三、原子量、原子质量和平均原子量

1. 原子量 该元素一摩尔质量对核素 ^{12}C 一摩尔质量/ 12 的比值。原子量的符号是 $A_r(E)$ ，即表示元素的相对原子量。原子量是没有单位的。

2. 原子质量 某核素一个原子的质量。规定以一个 ^{12}C 核素原子质量的 $1/12$ 为原子质量的单位，常用符号“u”表示。因而， ^{12}C 的原子质量等于 12u 。

3. 平均原子质量 也称平均原子量。某元素各同位素的原子质量与其所占的百分比乘积之和为该元素的平均原子质量。

要注意的是：

(1) 原子量和平均原子质量是两个不同的概念，前者

没有单位，而后者有单位（u）。

（2）原子质量和质量数是两个不同的概念，前者表示其核素一个原子的质量，其单位为u。后者为某核素原子核内质子数与中子数之和，因而质量数是整数。同一核素的原子质量和质量数在数值上相近。

四、分子式、分子量、化学式和化学式量

分子式是用元素符号表示物质分子组成的式子，组成该分子的各原子的原子量之和为分子量。

化学式是表示物质元素组成和其中各元素原子数目相比数的化学符号。化学式中各原子的原子量之和为化学式量。

§ 1.3 溶液的浓度

一、摩尔浓度

1. 摩尔

1971年第十四届国际大会制定了一个新的国际单位，即“物质的量”的单位摩尔。其定义为：摩尔是一个物系中所含物质的量，如果该物系中所含的基本单元数与0.012千克C—12的原子数目相等时，该物质的量叫做1摩尔，单位符号为mol。

应该注意的是：

（1）摩尔是一种计量单位，与常见的其它计数单位，如“打”等具有相同的意义和用途。但摩尔是以0.012kg¹²C中所含原子个数为标准（0.012kg¹²C中含 6.02×10^{23} 个碳原子，此数又称阿弗加德罗常数）来衡量其它物质中所含基本单位数目的多少。所以1mol任何物质所含的指定基本单

元数都是相等的，其基本单元为 6.02×10^{23} 个。

(2) 在使用物质的量单位——摩尔时，必须指明基本单元。基本单元可以是分子、原子、离子、电子或其它粒子及其特定组合体，在水处理技术中常见的基本单元是原子、分子或离子。

(3) 物质的量与物质的质量虽然仅是一字之差，但它们是两个完全不同的概念。物质的量的单位是摩尔，它是计量单位，同样摩尔的不同物质其质量是不同的。如，1摩尔氢原子的质量为1克，而同样是1摩尔的氧原子的质量为16克。

2. 摩尔质量

摩尔质量即一摩尔物质的质量。用 M 表示，单位是 $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。在数值上等于其原子量、分子量或离子量。如 ^{12}C 原子的摩尔质量为 $12\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ， H_2SO_4 分子为 $98\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ， Cl^- 离子为 $35.5\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

摩尔数、质量和摩尔质量的关系是

$$\text{摩尔数 (mol)} = \frac{\text{物质质量 (g)}}{\text{摩尔质量 (g} \cdot \text{mol}^{-1})} \quad (1-1)$$

3. 摩尔浓度

摩尔浓度是指1升溶液中所含溶质的摩尔数，用符号 M 表示。例如2M的氢氧化钠溶液，是表示在1升溶液中含有2摩尔的 NaOH 。

摩尔浓度可用下式表示：

$$\text{摩尔浓度 (M)} = \frac{\text{溶质的摩尔数 (n)}}{\text{溶液的体积 (V)}} \quad (1-2)$$

设： n 表示摩尔数， V 表示体积，则溶液的摩尔浓度可写成下列公式：

$$M = \frac{n}{V} \quad (1-3)$$

而溶质的摩尔数又可按 (1-1) 式计算, 设: G 表示物质的质量, MG 表示摩尔质量, 式 (1-1) 可写成:

$$n = \frac{G}{MG} \quad (1-4)$$

将式 (1-4) 代入 (1-3), 可得

$$MV = \frac{G}{MG} \quad \text{或} \quad G = MV \cdot MG \quad (1-5)$$

例 1 怎样配制 0.2M 的 Na_2CO_3 溶液 500 毫升?

解 Na_2CO_3 的摩尔质量 MG 为 $106\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$, 则根据式 (1-5) 计算 Na_2CO_3 的质量为:

$$G = M \cdot V \cdot MG = 0.2 \times \frac{500}{1000} \times 106 = 10.6 \text{ (克)}$$

配制: 称取 10.6 克无水 Na_2CO_3 加无盐水溶解, 稀释 500 毫升, 混合均匀后即得。

二、当量浓度

1. 当量、克当量、克当量数

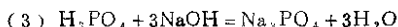
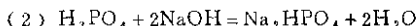
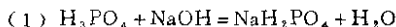
(1) 当量 某元素与 8 个质量单位的氧或 1 个质量单位的氢 (或更准确性, 是 1.008 个质量单位的氢) 相化合时, 或从化合物中置换一个质量单位的氢时, 所需该元素质量的数值, 叫做该元素的当量。

当然氢元素的当量为 1, 氧元素的当量为 8。由实验测得, 3 个质量单位的碳和 8 个质量单位的氧, 化合生成二氧化碳, 当然碳元素在这种化合物中的当量为 3。

有许多元素能彼此化合生成几种化合物, 所以元素的当

量，如根据不同的化合物的组成来计算，就有不同的值。实验测得 6 个质量单位的碳和 8 个质量单位的氧化合成一氧化碳，在这里碳元素的当量就是 6。

化合物根据不同的反应，也可能有几个数值不同的当量。例如，当磷酸与氢氧化钠反应时，不同条件可得不同产物：



在 (1) (2) (3) 反应式中磷酸的当量分别为 98, 49 和 32.67。

无论元素或化合物有几个当量值、它们之间的比值都是简单的整数比。

(2) 克当量、克当量数 物质的当量如果用“克”作单位来表示，称为克当量。用毫克来表示称为毫克当量。冠以克当量前面的数值称为克当量数 (n)，它与物质的当量 (E) 和该物质的质量 (G) 有如下关系：

$$n = \frac{G}{E} \quad (1-6)$$

2. 当量浓度

用 1 升溶液中所含溶质的克当量数来表示的浓度，称为当量浓度，用符号 N 表示。即：

$$\text{当量浓度 } (N) = \frac{\text{溶质的克当量数 } (n)}{\text{溶液的升数 } (V)} \quad (1-7)$$

$$\text{则} \quad n = NV \quad (1-8)$$

综合式 (1-6) 和式 (1-8) 得：

$$\frac{G}{E} = NV$$

则 $G = NVE$ (1-9)

例 2 怎样配制0.25N的NaOH溶液500毫升。

解 NaOH的当量为40。根据式(1-9)可计算出所需NaOH的质量。

$$G = NVE = 0.25 \times 40 \times \frac{500}{1000} = 5 \text{ (克)}$$

配制：称取5克NaOH，加水溶解后，稀释至500毫升，此溶液即为0.25N。

3. 当量定律

在任何化学反应中，反应物之间完全作用时，它们的克当量数一定相等，这个规律称为当量定律。

设 n_1 、 n_2 分别表示完全作用的两种物质的克当量数，则 $n_1 = n_2$

对于两种固体物质反应时，设 G_1 、 G_2 分别表示两种物质的质量(克)； E_1 、 E_2 分别表示两种物质的当量，根据式(1-6)，当量定律可用数学式表示如下：

$$\frac{G_1}{E_1} = \frac{G_2}{E_2} \quad (1-10)$$

对于两种溶液相互反应时，当量定律可用下列数学式表示：

$$N_1 V_1 = N_2 V_2 \quad (1-11)$$

例 3 用12N的浓硫酸，怎样配制2500毫升0.5N的稀硫酸？

解 因为溶液在加水稀释前后，只是溶液的体积改变，

而溶质的质量没有改变，即溶液在稀释前后其中的溶质的克当量数不变。由此可应用式 (1-11) 进行计算。

需12N的浓 H_2SO_4 体积 V_1 为：

$$V_1 = \frac{N_2 V_2}{N_1} = \frac{0.5 \times 2500}{12} = 104 \text{ (毫升)}$$

配制：取104毫升的12N H_2SO_4 ，加水稀释至2500毫升。

三、溶液浓度的相互换算

溶液的浓度表示方法可归纳为两类：一类是重量浓度，如重量百分浓度；另一类是体积浓度，如摩尔浓度和当量浓度。溶液的浓度相互换算，实质上是两个方面的换算：一种是溶质的质量（克数）摩尔数或克当量数的相互换算，即

溶质的质量（克）= 摩尔数 × 溶质的摩尔质量

溶质的质量（克）= 克当量数 × 溶质的克当量

二是溶液的质量和体积的换算，可通过溶液的密度来实现。

即

$$\text{溶液的密度 (克/毫升)} = \frac{\text{溶液的质量 (克)}}{\text{溶液的体积 (毫升)}}$$

或 溶液的质量（克）= 溶液的体积（毫升）× 溶液的密度（克/毫升）

如果应用以前的代表符号，则溶液之间浓度的相互换算可列于以下表中：

表1-1 溶液之间浓度相互换算表

	A	M	N
A		$M \cdot MG\% / 10d$	$N \cdot E\% / 10d$
M	$1000d \cdot A / MG$		$N / \text{化合价}$
N	$1000d \cdot A / E$	$M \times \text{化合价}$	

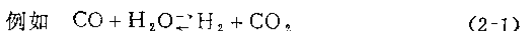
表中A为重量百分比浓度，式中d为密度的符号，单位：克/毫升。

第二章 沉淀物的溶解平衡

§2.1 化学平衡

一、化学反应的可逆性

很多化学反应是不能进行到底的，即化学反应进行到一定程度后，反应物能变成生成物，同时生成物也能变成反应物。这种反应称为可逆反应。



如以一个通式来表示可逆反应，则可以写成为：



二、化学平衡和平衡常数

对于式(2-2)的任意一个可逆反应，在一定程度下，其正反应速度为：

$$V_{\text{正}} = K_1 [\text{A}]^p [\text{B}]^q \quad (2-3)$$

而逆反应速度为：

$$V_{\text{逆}} = K_2 [\text{C}]^n [\text{D}]^m \quad (2-4)$$

随着反应的进行，A、B的浓度逐渐减小， $V_{\text{正}}$ 也逐渐减小；而C、D的浓度逐渐增大，因此 $V_{\text{逆}}$ 也就逐渐增大，最后能达到正反应速度和逆反应速度相等的状态，这种状态称为化学平衡状态，化学平衡是动态平衡，这时反应仍在进行，但正逆反应的速度相等，A、B、C、D的浓度都不再改变，即

$$V_{\text{正}} = V_{\text{逆}}$$

$$\text{所以} \quad K_1[A]^p[B]^q = K_2[C]^n[D]^m \quad (2-5)$$

整理后可得：

$$\frac{[C]^n[D]^m}{[A]^p[B]^q} = \frac{K_1}{K_2} = K \quad (2-6)$$

两个速度常数的比值 K 也是一个常数，称为化学平衡常数。这是质量作用定律用于可逆反应时的数学表达式。

凡是可逆反应，在确定的温度下平衡常数都有确定的数值。平衡常数是表示化学反应平衡状态的特性常数。某一反应的平衡常数愈大，说明在平衡时生成物浓度愈大，即正反应的趋势愈强，反之同样。

平衡常数与反应速度常数一样，与物质的浓度无关，但随温度的变化而改变，所以引用平衡常数时必须指明温度。

§ 2.2 沉淀物的溶解平衡

一、物质的溶解性

1. 溶解度

一种物质溶解在另一种物质里的能力，称为溶解性。物质的溶解性大小用溶解度来表示。在某一温度下，某物质在 1 升溶剂里达到饱和时所溶解的克数或毫克数或摩尔数。一些难溶物质在 25°C 时的溶解度，详见表 2-1。

2. 影响溶解度的因素

物质的溶解度随温度的高低而改变。大部分物质，随着温度的增高溶解度越大，这类物质称为具有正温度系数的物质。反之，则称为具有负温度系数的物质。在水处理过程中，经常遇到的 CaCO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 CaSO_4 和 CaSiO_3 均

属具有负温度系数的物质。

应当指出，溶解度是指某物质在纯水中单独存在而言的。如果水中同时含有几种可溶的物质，有些物质溶解度会有些改变，尤其是当温度变更时，就更为显著了。

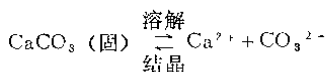
气体在水中的溶解度（也称溶解系数或吸附系数），决定于气体的性质、温度和压力。一般来讲，气体溶解度与温度成反比。假如几种不同的气体同时存在于水面上，每一种气体的溶解度都与它自己的分压成正比。由此可知，气体的溶解度，并不会因有另外气体同时存在而改变，仅与其本身产生的压力有关。例如，二氧化碳在水中的溶解度要比氧气高得多，但其溶解于天然水中的数量却非常少，这主要是因为二氧化碳在大气中的分压比较小的缘故。

二、溶度积

1. 溶解平衡

物质的溶解总是溶解过程和其结晶过程在同时进行的，当溶液的浓度增高到一定程度，直到两个过程的进行速度相等时，就建立起一个平衡系统，这时的溶液，就是饱和溶液。

如在 CaCO_3 的饱和溶液中，存在下列溶解平衡：



2. 溶度积

水是一种很好的溶剂，有万能溶剂之称，就是说几乎没有绝对不溶于水的物质。许多物质在水中很容易溶解，但是也有一些固体物质在水中溶解却比较困难，这些物质通常叫作难溶物质。在水处理工作中经常利用这一特性，把某些物