

125/135MW 火力发电机组技术丛书



电厂化学

周柏青 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

• 125/135MW 火力发电机组技术丛书 •

电 厂 化 学

周柏青 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是 125/135MW 火力发电机组技术丛书的《电厂化学》分册,书中系统地介绍了火力发电厂化学方面的有关知识,内容包括:电厂化学基础知识、水处理、锅炉结垢及其防止、蒸汽的污染与净化、热力设备的腐蚀及其防护、水汽质量监督、化学清洗、热力设备停用保护技术等,全书共十六章。

本书可供从事 125/135MW 火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员及管理人员阅读,也可作为现场运行、检修人员的培训教材,亦可供高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂化学/周柏青主编. —北京:中国电力出版社,
2003

(125/135MW 火力发电机组技术丛书)

ISBN 7-5083-1421-2

I. 电... II. 周... III. 火电厂-电厂化学-基
本知识 IV. TM621.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 011168 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

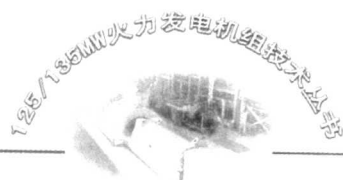
2003 年 7 月第一版 2003 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 17.75 印张 431 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



编 委 会

主任委员 唐必光

副主任委员 潘 笑 熊信银 胡念苏 周柏青 朱全利

委 员 (以姓氏笔画为序)

王建梅 卢理成 叶信芳 刘 勇 刘克兴 朱全利

余艳芝 吴耀武 张世荣 张国忠 李正奉 杨德先

陈志和 周柏青 罗 嘉 苗世洪 胡念苏 唐必光

夏中明 喻红梅 谢建君 谢诞梅 熊立红 熊信银

樊天竞 潘 笑

QAA32/02



前言

我国的火力发电机组正朝高参数、大容量方向发展，但 125MW 机组由于具有较好的经济性和运行性能，在火电厂仍占有一定比例。在发展过程中，通过对汽机通流部分的改造，又形成了 135MW 系列。为满足广大技术人员和现场生产人员了解 125/135MW 系列火力发电机组结构、运行、控制知识的需要，我们组织人员编写了这套《125/135MW 火力发电机组技术丛书》。本丛书包括《燃煤锅炉机组》《汽轮机设备及其系统》《电厂化学》《热工控制系统》《发电机及电气系统》五个分册。

本丛书可供从事 125/135MW 火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员及管理人员阅读，也可作为现场运行、检修人员的培训教材，亦可供高等院校有关专业师生参考。

《电厂化学》分册由武汉大学周柏青主编，参加编写的有：周柏青（第一、二、三、四、五、六、九、十章）、陈志和（第七、八章）、夏中明（第十一章）、李正奉（第十二、十三、十四、十五、十六章）。

本书由武汉大学钱达中教授主审，钱达中教授对全书进行了认真的审阅，并提出了不少宝贵的意见，在此谨表诚挚感谢！

由于部分设备所收集厂家资料不全，加之编者水平所限，错漏之处难免，敬请读者批评指正。

编者

2002 年 9 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 水在火力发电厂中的作用	1
第二节 火电厂中水处理的重要性	3
第二章 水质概述	5
第一节 常用化学名词	5
第二节 天然水中的杂质	16
第三节 水质指标	18
第四节 水质的图示方法	23
第五节 天然水的分类	24
第三章 混凝	26
第一节 浊质难沉的原因	26
第二节 胶体化学基础	27
第三节 混凝原理	31
第四节 影响混凝效果的因素	32
第五节 混凝过程及其原理	34
第六节 混凝剂和助凝剂	38
第七节 混凝剂加药系统	41
第四章 沉淀	46
第一节 颗粒沉降速度	46
第二节 理想沉淀池	47
第三节 平流沉淀池	48
第四节 斜管(板)沉淀池	53
第五章 水的澄清处理	56
第一节 澄清原理	56
第二节 机械搅拌澄清池	57

第三节	水力循环澄清池	63
第四节	泥渣悬浮澄清池	65
第五节	脉冲澄清池	67
第六章	水的过滤处理	70
第一节	滤床特性	70
第二节	过滤设备的工作过程	74
第三节	滤床的截污原理	76
第四节	水头损失	78
第五节	反洗	79
第六节	过滤设备	84
第七章	离子交换树脂与离子交换原理	91
第一节	离子交换树脂概述	91
第二节	离子交换树脂的性能	94
第三节	离子交换树脂的选择性和离子交换原理	98
第四节	离子交换平衡	100
第五节	离子交换速度	105
第六节	离子交换树脂的贮存、预处理、鉴别及分离	107
第八章	离子交换除盐	110
第一节	动态离子交换过程	110
第二节	复床除盐	114
第三节	带有弱型树脂的复床除盐	123
第四节	离子交换装置及运行操作	129
第五节	除碳器	143
第六节	混合床除盐	145
第七节	离子交换除盐系统	149
第八节	离子交换树脂的变质、污染和复苏	152
第九章	反渗透	157
第一节	反渗透脱盐的基本原理	157
第二节	膜的性能	161
第三节	膜的制作	164
第四节	反渗透系统的预处理	166
第五节	卷式反渗透装置	169
第六节	反渗透装置运行和管理	172
第十章	循环冷却水处理	175
第一节	冷却水系统	175
第二节	冷却水中的微生物及其危害	176
第三节	循环冷却水的水质变化	178
第四节	冷却水系统中的沉积物及其控制	180

第五节	阻垢处理	183
第六节	冷却水系统的腐蚀及其控制	186
第七节	冷却水系统中微生物的控制	190
第十一章	火力发电厂废水处理	194
第一节	概述	194
第二节	火力发电厂的废水	197
第三节	废水处理方法与系统	201
第四节	火力发电厂的废水处理技术	205
第十二章	锅炉结垢及其防止	212
第一节	水垢和水渣	212
第二节	水垢的形成及其防止	214
第三节	锅内磷酸盐防垢处理	217
第四节	高参数汽包炉炉水水质异常的原因	218
第五节	炉水协调 pH-磷酸盐处理	222
第十三章	蒸汽的污染与净化	224
第一节	蒸汽的污染	224
第二节	过热器中的沉积物	228
第三节	汽轮机内的盐类沉积	229
第四节	获得洁净蒸汽的方法	230
第十四章	热力设备的腐蚀与防护	235
第一节	热力设备腐蚀的特点	235
第二节	氧腐蚀	239
第三节	酸性腐蚀	243
第四节	锅炉炉水浓缩腐蚀	246
第五节	应力腐蚀	247
第六节	凝汽器铜管的腐蚀	249
第七节	发电机空芯铜导线的腐蚀与防护	255
第十五章	水、汽质量标准与监督	257
第一节	水、汽质量标准	257
第二节	水、汽的取样方法	259
第三节	水、汽取样分析装置	260
第四节	水、汽质量劣化时的处理	261
第十六章	化学清洗与停用保护	264
第一节	化学清洗	264
第二节	热力设备的停用保护	269
参考文献		275

绪 论

第一节 水在火力发电厂中的作用

发电厂大致可分为水力发电厂（简称水电厂）和火力发电厂（简称火电厂）等。前者是利用自然界水流落差推动水轮机而发电的，后者是利用各种燃料燃烧的化学热能将水加热变成蒸汽，用蒸汽推动汽轮机而发电的。用核燃料发电的电厂又称核电厂。火力发电厂中，单台发电机组额定功率（MW）有 25、50、125、200、300 和 600 等多个系列，目前，国内以 300MW 机组为主。本书重点介绍 125MW 火力发电机组的水处理技术。

一、发电机组的容量和蒸汽参数

在火电厂中，水进入锅炉后，吸收燃料（如煤、石油、核燃料或天然气）燃烧放出的热能，蒸发并加热变成过热蒸汽；过热蒸汽高速进入汽轮机中，冲动汽轮机叶片，带动汽轮机轴旋转，将热能转变成机械能；汽轮机带动发电机，将机械能转变成电能。所以锅炉、汽轮机和发电机为火力发电的主要设备。若将发电机组比作一个人，则锅炉、汽轮机相当于躯干，水相当于血液。为了保证发电机组正常运行，对锅炉用水的质量有很严的要求，而且机组中蒸汽的参数（压力、温度）愈高，对其要求也愈严。目前国内制造的锅炉、汽轮机机组的蒸汽参数及容量如表 1-1 所示。

表 1-1

发电厂机组的容量和蒸汽参数

名 称	额定功率 (MW)	蒸 汽 参 数			
		锅 炉		汽 轮 机	
		压力 (MPa)	温度 (℃)	压力 (MPa)	温度 (℃)
中压机组	6, 12, 25	3.9	450	3.43	435
高压机组	50, 100	9.81	540	8.82	535
超高压机组	125	13.23	55	12.23	550
	200	13.73	540	12.74	535
亚临界压力机组	300	16.68	555	16.17	550
		18.27	541	16.66	537
	600	18.27	541	16.66	537

二、凝汽式发电厂和热电厂的汽水循环系统

根据对外是否供汽，火电厂又可分为凝汽式发电厂和热电厂。

1. 凝汽式发电厂汽水循环系统

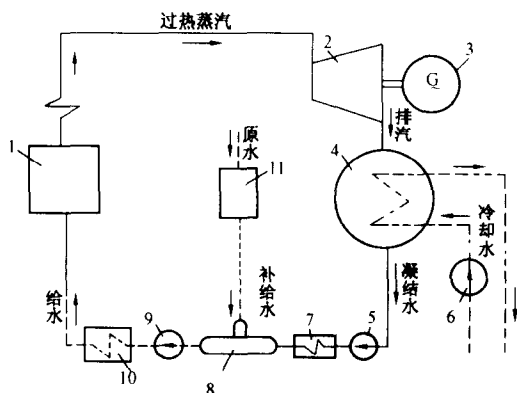


图 1-1 凝汽式发电厂汽水循环系统主要流程

1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；5—凝结水泵；6—冷却水泵；7—低压加热器；8—除氧器；9—给水泵；10—高压加热器；11—水处理设备

在凝汽式发电厂中，汽水呈循环状运行，不对外供汽，汽水循环系统的流程如图 1-1 所示。由图可见，锅炉（1）产生的过热蒸汽在汽轮机（2）做功后进入凝汽器（4），在凝汽器中被冷却成凝结水，凝结水经凝结水泵（5）送到低压加热器（7），加热后送入除氧器（8）中除去水中氧气，再由给水泵（9）将已除氧的水送到高压加热器（10）后作为给水进入锅炉。

在上述系统中，汽水在循环流动过程中总难免有些损失，为了维持发电厂热力系统的汽水循环运行正常，就要用水补充这些损失，这部分水称为补给水。凝汽式发电厂在正常运行情况下，补给水量不超过锅炉额定蒸发量的 2%~4%。

造成汽水损失的主要原因有如下几个方面：

（1）锅炉部分。锅炉的排污放水、锅炉安全门和过热器放汽门的向外排汽、用蒸汽推动附属机械（如汽动给水泵）、蒸汽吹灰和燃烧液体燃料（如油等）时采用蒸汽雾化法等，都要造成汽水损失。

（2）汽轮机机组。汽轮机的轴封处要连续向外排汽，在抽气器和除氧器排气口处会随空气排出一些蒸汽，造成损失。

（3）各种水箱。各种水箱（如疏水箱等）有溢流和热水的蒸发损失。

（4）管道系统。各管道系统法兰盘连接处不严密和阀门泄漏等，也会造成汽水损失。

2. 热电厂汽水循环系统

热电厂除发电外，还向附近的工厂和住宅区供生产用汽和取暖用热水。在热电厂中，由于用户用热方式不同和供热系统复杂等原因，送出的蒸汽大部分不能收回，汽水损失较大，所以它的补给水量通常比凝汽式电厂大得多。图 1-2 为热电厂汽水循环系统的主要流程。

三、水在汽水循环系统中不同的名称

由于水在火电厂水汽循环系统中所经历的过程不同，水质常有较大的差别。因此，根据实用的需要，我们常给予这些水以不同的名称，现简述如下：

（1）原水（又称生水）。原水是指未经任何处理的天然水（如江河、湖、地下水，等等），是火电厂中各种用水的来源。

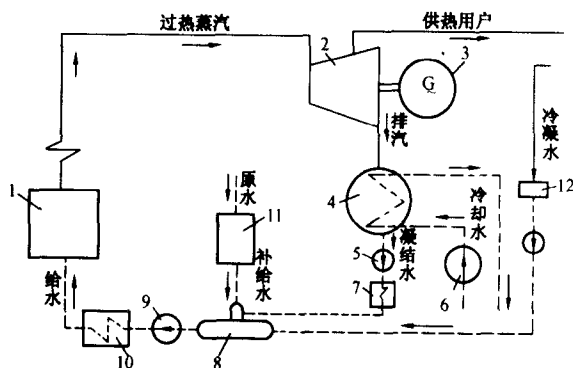


图 1-2 热电厂汽水循环系统主要流程

1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；5—凝结水泵；6—冷却水泵；7—低压加热器；8—除氧器；9—给水泵；10—高压加热器；11—水处理设备；12—返回凝结水箱；

(2) 锅炉补给水。原水经过各种方法净化处理后，用来补充火电厂汽水损失的水，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。125MW 机组一般用二级除盐水作为补给水。

(3) 凝结水。在汽轮机中做功后的蒸汽经冷凝成的水，称为凝结水。

(4) 疏水。各种水汽管道和用汽设备中的蒸汽冷凝水，称为疏水。疏水经疏水器汇集到疏水箱或并入凝结水系统中。

(5) 返回水。热电厂向热用户供热后，回收的蒸汽冷凝水，称为返回水。返回水又分为热网加热器冷凝水和生产返回冷凝水。

(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，习惯上简称炉水。

(8) 冷却水。用作冷却介质的水称为冷却水。在电厂中，冷却水主要是指通过凝汽器用以冷却汽轮机排汽的水，其次为发电机的内冷水。

第二节 火电厂中水处理的重要性

一、水质对热力系统的影响

长期的实践使人们认识到，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，这种水如进入汽水循环系统，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。火电厂中由于汽品质不良而引起的危害简述如下：

(1) 热力设备的结垢。如果进入锅炉或其他热交换器的水质不良，则经过一段时间运行后，在和水接触的受热面上，会生成一些固体附着物，这种现象称为结垢，这些固体附着物称为水垢。因为水垢的导热性比金属的差几百倍，而这些水垢又极易在热负荷很高的锅炉炉管中生成，所以结垢对锅炉（或热交换器）的危害很大。结垢可使结垢部位的金属管壁温度过高，引起金属强度下降，这样在管内压力的作用下，就会发生管道局部变形、产生鼓包，甚至引起爆管等严重事故。结垢不仅危害安全运行，而且还会大大降低火电厂的经济性。例如，当火电厂锅炉的省煤器中结有 1mm 厚的水垢时，其燃料用量就比无垢时多消耗 1.5% ~ 2.0%，火电厂锅炉的容量一般都很大，每年使用的燃料量也很大，所以燃料的消耗率即使只有微小的增加，也会造成巨额的经济损失；另外，汽轮机和凝汽器内结垢会导致凝汽器真空度降低，从而使汽轮机的热效率和出力下降；加热器的结垢会使水的加热温度达不到设计值，使整个热力系统的经济性降低；而且，热力设备结垢以后，必须及时清洗工作，这就要停止运行，因而减少了设备的年利用小时数；此外，还要增加检修工作量和费用等。

(2) 热力设备的腐蚀。火电厂热力设备的金属经常和水接触，若水质不良，则会引起金属腐蚀。火电厂的给水管道、各种加热器、锅炉省煤器、水冷壁、过热器和汽轮机凝汽器等，都会因水质问题而腐蚀。腐蚀不仅要缩短设备本身的使用期限，造成经济损失，而且金属腐蚀产物转入水中，使给水中杂质增多，从而加重在高热负荷受热面上的结垢，结成的垢又会加速锅炉炉管腐蚀。此种恶性循环，会迅速导致爆管事故。此外，金属的腐蚀产物被蒸

汽带到汽轮机中沉积下来后，也会严重地影响汽轮机的安全、经济运行。

(3) 过热器和汽轮机的积盐。水质不良会使锅炉不能产生高纯度的蒸汽，随蒸汽带出的杂质就会沉积在蒸汽通过的各个部位，如过热器和汽轮机，这种现象称为积盐。过热器管内积盐会引起金属管壁过热甚至爆管；汽轮机内积盐会大大降低汽轮机的出力和效率，特别是高温高压大容量汽轮机，它的高压部分蒸汽流通的截面积很小，所以少量的积盐也会大大增加蒸汽流通的阻力，使汽轮机的出力下降。当汽轮机积盐严重时，还会使推力轴承负荷增大，隔板弯曲，造成事故停机。

二、水处理工作的主要内容

火电厂水处理工作就是为了保证热力系统各部分有良好的汽水品质，以防止热力设备的结垢、积盐和腐蚀。因此，在火电厂中，水处理工作对保证发电厂的安全、经济运行具有十分重要的意义。

火电厂的水处理工作主要有以下内容：

(1) 净化原水，制备热力系统所需质量的补给水。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、镁离子的软化处理；或除去水中全部溶解盐类的除盐处理。这些制备补给水的处理，通常称为炉外水处理。

(2) 对给水进行除氧、加药等处理。

(3) 对汽包锅炉进行锅炉水的加药处理和排污，这些工作称为锅内水处理（习惯上又称炉内水处理）。

(4) 对直流锅炉机组或某些亚临界压力、汽包锅炉机组进行凝结水的净化处理。

(5) 在热电厂中，对生产返回水进行除油、除铁等净化处理。

(6) 对冷却水进行防垢、防腐和防止微生物滋生等处理。

(7) 对热力系统各部分的汽水质量进行监督。

(8) 对各种废水进行处理。

(9) 提供饮用水。

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

水质概述

水是人类生存和发展所必需的特殊自然资源，也是发电厂生产过程中不可缺少的物质。由于发电锅炉对其用水的水质要求很严格，所以天然水必须经净化处理后才能使用。发电厂中采用的水处理方法，是依据热力设备对水质的要求和天然水中杂质的含量和种类来决定的。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。

第一节 常用化学名词

水分子(H_2O)是由两个氢原子(H)和一个氧原子(O)构成的。水是一种溶解能力很强的溶剂，能溶解大气中、地表面和地下土壤岩层里的许多物质。由于水的流动，使得一些不溶于水的物质混杂在水中，这些物质统称为杂质，大自然中很纯的水是没有的。天然水中的杂质种类很多，一般是由常见的20种左右的元素构成。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。

为了便于学习本书内容，现将水处理工作中常用的几个化学名词作简要叙述。

一、溶液

一种物质以分子、原子或离子状态分散于另一种物质中所构成的均匀而又稳定的体系叫溶液，溶液中被分散的物质叫做溶质(又称分散质)，用以分散溶质的物质叫做溶剂(又称分散剂)，发生这种均匀分散的现象叫做溶解。例如，把少量白糖放入水中，就会发现糖粒逐渐变小直到完全消失，这是因为糖粒在水分子作用下，均匀地分散在水里的缘故；又如把少量食盐放入水中，食盐颗粒在水分子的作用下溶解于水中，形成食盐水溶液。以上两例中，糖和食盐是溶质，水是溶剂。用水作为溶剂所得的溶液称水溶液，用非水(如酒精、汽油、苯)作为溶剂所得的溶液称非水溶液。通常所说的溶液一般是指水溶液。

以上所介绍的溶液属于不浑浊、外观为均一状态的均匀体系。在这个体系里，溶质以分子或离子形式均匀地分布在溶剂分子间，通常把这种溶液叫做真溶液。还有一种体系是，被分散后的物质微粒是由较多的分子或离子所组成，由于它们的颗粒较小，肉眼仍然观察不到，外观也表现为均一的透明状态；但在光线照射下，却能看见由这些颗粒所散射的光束，这种体系称为胶体溶液。如果分散在水中的颗粒很大，甚至用肉眼都能观察出来，从外观看它就是不均一的，而且经过静置后，大部分分散物质会沉降下来，这种体系通常称之为悬浊液，如江河中含有泥砂的水，即属悬浊液。

二、物质的量

“物质的量”是表示物质多少的物理量，符号为 n 。

物质 B 的物质的量 n_B 的 SI 单位为“摩[尔]”，符号为 mol。摩尔 (mol) 的定义是指一系统的物质的量所包含的基本单元数与 0.012kg 碳-12 的原子数目相等。在使用摩尔时，基本单元应予以说明，它们可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子，或是这些粒子的特定组合。如果系统中单元 B 的数目与 0.012kg 碳-12 的原子数目一样多，则物质 B 的物质的量 n_B 就是 1mol。如果系统中单元 B 的数目与 0.018kg 碳-12 的原子数目一样多，则物质 B 的物质的量 n_B 就是 $0.018/0.012 = 1.5\text{mol}$ 。

物质 B 的基本单元，根据不同情况可以是各种粒子或是这些粒子的不同组合。因此，物质 B 的基本单元可以是 H 、 H_2 、 H^+ 、 e^- 、 $\frac{1}{2}\text{H}_2$ 和 $(\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2)$ 等。

物质 B 的物质的量 n_B 与物质 B 的质量 W_B 的关系为：

$$n_B = W_B / M_B \quad (2-1)$$

式中： W_B 为物质 B 的质量，g； M_B 为物质 B 的摩尔质量，g/mol。

M_B 与所选用的基本单元 B 有关，其值相当于基本单元的相对粒子质量，当基本单元为化学元素及其特定组合时，数值上等于基本单元的原子量之和，例如： $M(\text{H}) = 1 \times 1.008 = 1.008(\text{g/mol})$ ， $M(\text{H}_2) = 2 \times 1.008 = 2.016(\text{g/mol})$ ， $M(\text{NaOH}) = 1 \times 22.99 + 1 \times 16.00 + 1 \times 1.008 = 39.998(\text{g/mol})$ ， $M(\frac{1}{5}\text{KMnO}_4) = (1 \times 39.10 + 1 \times 54.94 + 4 \times 16.00)/5 = 31.608(\text{g/mol})$ ， $M(\text{KMnO}_4) = 1 \times 39.10 + 1 \times 54.94 + 4 \times 16.00 = 158.04(\text{g/mol})$ 。

三、溶液的浓度

在电厂化学工作中，经常需要知道某溶液中溶质的含量（即浓度），或者要配制某种浓度的溶液。这些都涉及溶质和溶剂间的数量关系。下面介绍几种常用的浓度表示方法。

1. 物质的量浓度

物质的量浓度简称浓度。物质 B 的量浓度定义为：溶质 B 的物质的量 (n_B) 除以溶液的体积 ($V_{\text{溶液}}$)，用符号 c_B 表示，即

$$c_B = \frac{n_B}{V_{\text{溶液}}} \quad (2-2)$$

浓度的 SI 单位为摩尔/分米³ (mol/dm^3) 或摩尔/升 (mol/L)。对于稀溶液，常用毫摩尔/分米³ (mmol/dm^3) 或毫摩尔/升 (mmol/L)。

2. 质量摩尔浓度

溶液中溶质 B 的摩尔量 (mol) 除以溶剂的千克数 (kg)，称为溶质 B 的质量摩尔浓度，用符号 m_B 表示，即

$$m_B = \frac{\text{溶质 B 的量 (mol)}}{\text{溶剂的质量 (kg)}} \quad (2-3)$$

质量摩尔浓度的 SI 单位为摩尔/千克 (mol/kg)。

3. 质量分数和质量百分浓度

溶质的质量 ($m_{\text{溶质}}$) 与溶液的质量 ($m_{\text{溶液}}$) 之比称为该溶质的质量分数，若以百分数表示，则称为质量百分浓度（或称重量百分浓度）。例如质量分数为 0.04 的盐酸溶液，表示 1 份质量的该溶液中盐酸 (HCl) 占 0.04 份和水 (H_2O) 占 0.96 份，或者说该盐酸溶液的质

量百分浓度为 4%，即每 100g 该溶液中含有 4gHCl 和 96gH₂O。

物质 B 的质量分数用符号 w_B 表示，即

$$w_B = \frac{m_{\text{溶质}}}{m_{\text{溶液}}} = \frac{m_{\text{溶质}}}{m_{\text{溶质}} + m_{\text{溶剂}}} \quad (2-4)$$

式中溶液的质量 ($m_{\text{溶液}}$) 等于溶质的质量 ($m_{\text{溶质}}$) 与溶剂的质量 ($m_{\text{溶剂}}$) 之和。

4. 摩尔分数

混合物中物质 B 的物质的量与混合物的总物质的量之比，称为物质 B 的摩尔分数，用符号 x_B 表示，即

$$x_B = \frac{n_B}{n_{\text{总}}} \quad (2-5)$$

式中： n_B 为物质 B 的物质的量，mol； $n_{\text{总}}$ 为混合物中各物质的量之和，mol。

根据定义可知，混合物中各物质的摩尔分数之和等于 1，即

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1 \quad (2-6)$$

5. 重容百分浓度

重容百分浓度是指在 100mL 或 100cm³ 溶液中所含溶质的克数，符号为 % (重/容)。这种浓度的表示方法，通常适用于溶质为固体时溶液的配制。但溶液以指示剂称呼者，其浓度则不标注 (重/容)。例如 0.1% 甲基橙指示剂表示在 100mL 该指示剂溶液中含有甲基橙 0.1g。

$$\text{重容百分浓度} = \frac{\text{溶质的质量 (g)}}{\text{溶液的体积 (mL)}} \times 100\% \quad (2-7)$$

因为在一定的温度下，给定物质水溶液的密度和其百分浓度有一定的关系，所以为了获取某一物质水溶液的质量百分浓度，可以用测定其温度和密度的方法求得。例如 4.00% HCl 在 20℃ 时密度为 1.0179g/cm³。

6. 体积比浓度

体积比浓度是指将体积为 V_1 的特定溶液加到体积为 V_2 的溶剂中，所配制溶液的浓度，符号为 ($V_1 + V_2$)。如硫酸溶液 (1+3) 是指 1 体积的浓硫酸与 3 体积的水混合而成的硫酸溶液。

7. 当量浓度

当量浓度是指在 1L 溶液中所含溶质 B 的克当量数，符号为 N_B 。目前，我国已废除“当量”和“当量浓度”的表示法。但是，此种表示法在历史上已使用了许多年，今后相当长时期仍会习惯沿用。为了便于对照，这里讲一下当量浓度与物质的量浓度的关系。

(1) 当量。①元素的当量等于原子量除以化合价。例如：钙 (Ca) 的原子量为 40.08，化合价为 2，故 Ca 的当量为 $40.08/2 = 20.04$ ；钠 (Na) 的原子量为 22.99，化合价为 1，故 Na 的当量为 $22.99/1 = 22.99$ 。②化合物的当量等于分子量除以正价总数 (或负价总数)。例如：氧化钙 (CaO) 的分子量为 56.08，它的正价总数 (或负价总数) 为 2，故 CaO 的当量为 $56.08/2 = 28.02$ ；硫酸 (H₂SO₄) 的分子量为 98.09，它的正价总数 (或负价总数) 为 2，故 H₂SO₄ 的当量为 $98.09/2 = 49.05$ 。③离子的当量等于它的式量除以电荷数。例如：镁离子 (Mg²⁺) 的式量为 24.31，它的电荷数为 2，故 Mg²⁺ 的当量为 $24.31/2 = 12.16$ ；重碳酸根

(HCO_3^-) 的式量为 61.02, 它的电荷数为 1, 故 HCO_3^- 的当量为 $61.02/1 = 61.02$ 。④氧化剂或还原剂的当量等于它的式量除以得(或失)电子数。例如:高锰酸钾(KMnO_4)在酸性条件下氧化有机物时, 1 个 KMnO_4 得到 5 个电子, KMnO_4 的式量为 158.04, 故其当量为 $158.04/5 = 31.61$ 。

(2) 克当量。以单位为克表示的当量称克当量, 物质 B 的克当量用符号 E_B 表示。克当量在数值上与当量相同, 例如: $E(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98.09$ 克, $E(\text{Mg}^{2+}) = 12.16$ 克。

(3) 物质的量浓度与克当量浓度的关系。克当量与基本单元为一个电荷粒子的摩尔质量相同。

对于一价离子化合物, 例如食盐 (NaCl), 克当量与摩尔质量相等, 故物质的量浓度与克当量浓度相等, 即:

$$E(\text{NaCl}) = M(\text{NaCl}), N(\text{NaCl}) = c(\text{NaCl})$$

对于两价离子化合物, 例如硫酸亚铁 (FeSO_4), 正价总数(或负价总数)为 2, 克当量与基本单元为 $1/2\text{FeSO}_4$ 的摩尔质量相等, 或者说克当量与基本单元为 FeSO_4 的摩尔质量的二分之一相等, 即:

$$E(\text{FeSO}_4) = M\left(\frac{1}{2}\text{FeSO}_4\right), N(\text{FeSO}_4) = c\left(\frac{1}{2}\text{FeSO}_4\right)$$

或

$$E(\text{FeSO}_4) = M(\text{FeSO}_4)/2, N(\text{FeSO}_4) = 2c(\text{FeSO}_4)$$

对于三价离子化合物, 例如硫酸铝 [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$], 正价总数(或负价总数)为 6, 克当量与基本单元为 $1/6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 的摩尔质量相等, 或者说克当量与基本单元为 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 的摩尔质量的六分之一相等, 即:

$$E[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3] = M\left[\frac{1}{6}\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\right], N[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3] = c\left[\frac{1}{6}\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\right]$$

$$\text{或 } E[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3] = M[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]/6, N[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3] = 6c[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$$

8. 单位体积或单位质量溶液中含有的溶质质量

溶液的体积单位通常用升 (L), 也有用毫升 (mL) 和微升 (μL) 的; 溶质质量单位通常用克 (g)、毫克 (mg) 或微克 (μg)。上述体积单位和质量单位可组合成多个浓度单位, 如 mg/L 、 $\mu\text{g/L}$ 和 g/mL 等。对于稀的水溶液, 1L 水溶液的质量近似地等于 1kg, 1mL 水溶液的质量近似地等于 1g, 在这种情况下, $\text{mg/L} \approx \text{mg/kg}$ 、 $\mu\text{g/L} \approx \mu\text{g/kg}$ 和 $\text{g/mL} \approx \text{g/g}$ 。例如 1L 水中含有铁化合物的质量以铁 (Fe) 表示为 0.004g, 其含量可以用下面各种单位表示。

因 $1\text{g} = 1000\text{mg}$, $1\text{mg} = 1000\mu\text{g}$, 故

Fe 含量 = 0.004g/L (或 g/kg) 或 Fe 含量 = 4mg/L (或 mg/kg) 或 Fe 含量 = $4000\mu\text{g/L}$ (或 $\mu\text{g/kg}$)

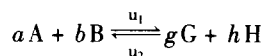
在天然水及其处理过程中, 水中溶质含量一般都很少, 所以比较普遍地采用单位 mg/L 、 $\mu\text{g/L}$, 有时还用 ppm 或 ppb 来表示。

ppm 是指在一百万份质量的溶液中所含溶质质量的份数 (即 1×10^{-6}), 所以它和 mg/kg 的表示法相同, 对一般的稀溶液也可看成是 mg/L ; ppb 表示在十亿份质量溶液中所含溶质质量的份数 (即 1×10^{-9}), 它可看成是 $\mu\text{g/kg}$ 。

四、化学反应的速率

化学反应速率指在一定条件下，反应物转变为生成物的速率。化学反应速率经常用单位时间内反应物浓度的减少或生成物浓度的增加来表示。浓度一般用 mol/dm^3 ，时间用 s (秒)、min (分钟) 或 h (小时) 为单位来表示。

基元反应的化学反应速率与反应物浓度以其计量数为指数的幂的连乘积成正比，这就是质量作用定律。设有一基元反应



则该反应的速率方程可写为

$$v_1 = k_1 [A]^a [B]^b \quad v_2 = k_2 [G]^g [H]^h$$

式中： v_1 、 v_2 分别为正反应和逆反应的速率； $[A]$ 、 $[B]$ 分别为反应物 A 和 B 的浓度； $[G]$ 、 $[H]$ 分别为产物 G 和 H 的浓度； a 、 b 、 g 、 h 为可逆反应方程配平时的计量数； k_1 、 k_2 分别为正反应和逆反应的速率常数。

碰撞理论认为，碰撞中能发生反应的一组分子（简称分子组）首先必须具备足够的能量，以克服分子无限接近时电子云之间的斥力，从而导致分子重排，即发生化学反应。我们把具有足够能量的分子组称为活化分子组。

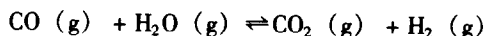
化学反应速率除与反应的本性（如活化能）有关外，还与反应条件（如浓度、温度、催化剂）有关。（1）反应的活化能（ E_a ）越低，活化分子组所占的比例越多，反应物分子有效碰撞的频率也就越高，故反应速率越大。（2）增加反应物浓度时，单位体积内活化分子组数目增多，从而增加了单位时间内在此体积中反应物分子有效碰撞频率，故导致反应速率加大。（3）温度对化学反应速率的影响特别显著。以氢气（ H_2 ）和氧气（ O_2 ）合成水（ H_2O ）的反应为例，在常温下反应速率十分缓慢，以致几年都觉察不到有 H_2O 生成。如果温度升高到 873K，它们立即反应，并发生猛烈爆炸。一般来说，温度升高，不仅是分子间碰撞频率增加，更重要的是活化分子组的百分数增大，有效碰撞的百分数增加，使反应速率大大地加快。（4）催化剂是一种能改变化学反应速率，其本身在反应前后质量和化学组成均不改变的物质。凡能加快反应速率的催化剂叫正催化剂，凡能减慢反应速率的催化剂叫负催化剂。一般提到的催化剂，若不明确指出是负催化剂时，则指正催化剂。加催化剂使活化能降低，活化分子组的百分数增加，故反应速率加快。

五、化学平衡

在研究物质的变化时，人们不仅注意反应的方向和反应的速率，而且十分关心化学反应所能完成的程度，即在指定的条件下，反应物可以转变成产物的最大限度。这就是化学平衡问题。

1. 化学反应的可逆性和化学平衡

在一定条件下，一个化学反应一般既可按反应方程式从左向右进行，又可以从右向左进行，这叫做化学反应的可逆性。例如，高温下的反应：



在一氧化碳 $[\text{CO}(\text{g})]$ 与水蒸气 $[\text{H}_2\text{O}(\text{g})]$ 作用生成二氧化碳 $[\text{CO}_2(\text{g})]$ 与氢气 $[\text{H}_2(\text{g})]$ 的同时，也进行着 CO_2 与 H_2 反应生成 CO 与 H_2O 的过程。向右进行的反应叫正反应，向左进行的反应叫逆反应。又例如银离子（ Ag^+ ）与氯离子（ Cl^- ）可以生成氯化银