



压水堆核电站操纵人员基础理论培训系列教材

# 核 电 厂 水 化 学

Water Chemistry of Nuclear Power Plants

韩延德 编著



原子能出版社

压水堆核电站操纵人员基础理论培训系列教材

# 核电厂水化学

## Water Chemistry of Nuclear Power Plants

韩延德 编著

原子能出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

核电厂水化学 / 韩延德编著. —北京:原子能出版社,2010.7

(压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材)

ISBN 978-7-5022-4979-3

I. ①核… II. ①韩… III. ①压水型堆—核电厂—水化学—技术培训—教材 IV. ①TM623.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 130846 号

## 内 容 简 介

本书是一本概论性教材。全书共分 10 章,分别介绍了水化学在压水堆核电厂中的重要作用,水化学基础理论,腐蚀及其防护,化学补偿控制,冷却剂辐射化学,辐射场控制,一、二回路水的 pH 控制,一、二回路系统的水化学准则,水处理工艺和系统以及水化学分析和监测。

本书是压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材之一,也可供从事核电工程的相关技术人员及高等院校相关专业的师生参考。

## 核电厂水化学

---

策 划 刘 朔 张 琳  
出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)  
责任编辑 肖 萍  
技术编辑 冯莲凤  
责任印制 潘玉玲  
印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司  
经 销 全国新华书店  
开 本 787 mm×1092 mm 1/16  
印 张 12 字 数 295 千字  
版 次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5022-4979-3  
印 数 1—2500 定 价 52.00 元

---

网址:<http://www.aep.com.cn>

发行电话:010-68452845

E-mail: [atomep123@126.com](mailto:atomep123@126.com)

版权所有 侵权必究

# 《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》

## 编 委 会

主 任：王乃彦

副主任：李和香 李济民 肖 武

顾 问：邵向业 罗璋琳 李文焱 郑福裕 浦胜娣

委 员：（按姓氏拼音顺序排列）

丁云峰 顾颖宾 郭文琪 韩延德 郝老迷

黄兴蓉 李和香 李吉根 李济民 李文焱

李泽华 刘国发 罗璋琳 浦胜娣 阮於珍

邵向业 王 略 王乃彦 夏延龄 肖 武

阎克智 俞尔俊 臧希年 赵郁森 郑福裕

周一东

### 编委会办公室

主 任：肖 武

成 员：章 超 高小林 梁超梅 周 萍 宋 慧

樊 勤 付 冉

# 《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》

## 校审专家

(按姓氏拼音顺序排列)

### 一审专家:

高秀清	高永春	李文焱	李永章	刘耕国
罗璋琳	彭木彰	浦胜娣	吴炳祥	夏益华
张培升	赵兆颐			

### 二审专家:

陈 跃	付卫彬	黄志军	蒋祖跃	李守平
马明泽	毛正宥	潘泽飞	唐锡文	王瑞正
魏 挺	薛峻峰	杨 炜	朱晓斌	

### 统审专家:

曹述栋	丁卫东	丁云峰	宫广臣	苟 峰
顾颖宾	郭利民	何小剑	黄世强	廖伟明
刘志勇	马明泽	毛正宥	缪亚民	戚屯锋
苏圣兵	孙光弟	王晓航	魏国良	吴 放
吴 岗	杨昭刚	俞卓平	张福宝	张志雄
周卫红				

# 前 言

核电厂操纵人员的素质关系到核电厂的安全运营,而培训工作是保证人员素质的基本环节之一。为适应当前我国大力发展核电的形势,保证核电厂操纵人员的培训质量,使基础理论培训满足国家核安全法规与行业规定的要求,便于对培训过程实施统一规范的管理,国家主管部门决定编写一套适用于核电厂操纵人员的基础理论培训教材——《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》。鉴于核工业研究生部在近20年的核电基础理论培训中,积累了丰富的教学及管理经验,具有稳定的师资队伍和较完整的教材体系,故由核工业研究生部具体承担教材编写的组织工作。

为了编好操纵人员培训教材,核工业研究生部牵头组织长期从事核电培训的专家、教授进行认真分析和讨论,根据我国现有堆型的特点,从压水堆核电厂入手,由核电厂、核动力运行研究所、操纵人员资格审查委员会等单位的专家共同参与编写。这套教材共十二册,包括《核反应堆物理》、《核反应堆热工水力学》、《核电厂辐射防护》、《核电厂材料》、《核电厂通用机械设备》、《核电厂水化学》、《核电厂电气原理与设备》、《核电厂核蒸汽供应系统》、《核电厂蒸汽动力转换系统》、《核电厂仪表与控制》、《核电厂核安全》、《核电厂运行概论》。这套教材内容以核电厂相关专业的基本概念、基本原理及基础知识为主,可为操纵人员下一步培训打下良好的理论基础。

本套教材是经过充分准备、精心组织而完成的。首先,根据核电厂操纵人员的培训目标,按照《核电厂操纵人员的执照考核标准》(EJ/T 1043—2004)的相关内容和要求进行课程设置、制定教材编写原则、明确每种教材应涵盖的内容;在总结以往教学经验的基础上,充分征求各核电厂专家的意见,形成了内容完整、要求明确的教材编写大纲。其次,聘请既有较高的专业水平又有较强的实际工作能力和丰富的教学

经验的专家担任本套教材的编者,并为编者提供教材编写技巧、《著作权法》等相关知识的讲座和模拟机现场观摩学习;编者根据教材编写原则和大纲编写具体内容,力求做到既符合学员的认知规律又贴近核电站的实际。再次,请理论功底扎实、教学经验丰富的教授、专家根据教学原则对教材内容的准确性、系统性等进行审查,并广泛征求任课教师的意见;同时请经验丰富的核电站专家结合实际进行审查。编者根据上述意见对教材进行认真修改后,再征求各方意见,最终由操纵人员资格审查委员会审定。

本套教材中《核电站电气原理与设备》由江苏核电有限公司具有丰富实际工作经验的专家编写。其余的各分册由核工业研究生部多年从事核电培训教学工作、教学及实践经验丰富的教授、专家编写。

在本套教材的编审过程中,核工业研究生部的任课教师们认真参与教材的编审和研讨;江苏核电有限公司专门成立“电气教材编写专项组”,精心组织编审;各核电站积极推荐审稿专家,提供编写教材所需资料;核电秦山联营有限公司组织一线人员与编者进行对口交流,创造条件为编者提供模拟机现场演示与讲解;各核电站、核动力运行研究所、操纵人员资格审查委员会等单位的专家们认真审稿,提出许多宝贵意见;原子能出版社自始至终给予通力合作,提前介入指导,缩短了出版周期。

本套教材的编制出版,凝聚着编、审、校、印及组织管理人员的大量心血,同时得到各相关单位的大力支持和热情帮助,在此深表谢意!

编委会

2010年11月

# 编者的话

《核电厂水化学》是根据核电基础理论培训教材编写大纲要求,在广泛听取核电专家意见的基础上编写的,是《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》之一,也可供核电厂相关人员参考。

本书根据《核动力厂运行安全规定》(HAF103)和《核电厂人员的配备、招聘、培训和授权》(HAD103/05)的要求,内容以基础理论知识、基本概念和基本原理为主,涵盖了《核电厂操纵人员的执照考核》标准(EJ/T 1043—2004)附录A.3.6、A.4的内容。

本书以核工业研究生部核电厂操纵人员培训讲义《压水堆水化学》为基础,结合任课老师的教学实践作了修改和补充。在编写上,尽量从原理上着重讲清楚基本概念,并注意联系实际,将这些基本概念与核电厂的运行实际相结合。在内容选择和安排上,为便于读者理解,力求做到由浅入深,尽量避免艰深的理论,做到既重点突出,又具有一定的全面性、系统性。

全书共分10章。第1章绪论,介绍水化学在压水堆核电厂中的重要作用;第2章介绍水化学基础理论;第3章介绍腐蚀及其防护;第4章介绍化学补偿控制;第5章介绍冷却剂辐射化学;第6章介绍辐射场控制;第7章介绍一、二回路水的pH控制;第8章介绍PWR一、二回路系统的水化学准则;第9章介绍PWR水处理工艺和系统;第10章介绍PWR水化学分析和监测。

本书在编写过程中,参考了核工业研究生部、秦山核电有限公司、西安交通大学和大亚湾核电厂等单位由苏淑娟、林芳良、方能虎和李运康等同志编写的多本相关内部讲义。同时,高秀清、陈跃等专家审校了全文,编者一并表示诚挚的谢意。

书中如有不妥之处,恳请批评指正。

编者

2010年11月



# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 屏障的完整性 .....	(1)
1.2 辐射场及其控制 .....	(2)
1.3 水化学控制 .....	(2)
复习题 .....	(3)
<b>第 2 章 水化学基础理论</b> .....	(4)
2.1 元素周期表 .....	(4)
2.1.1 元素和元素的周期表 .....	(4)
2.1.2 元素的周期性 .....	(4)
2.2 水的结构与特性 .....	(8)
2.2.1 水的结构与特性 .....	(8)
2.2.2 水的物理与化学性质 .....	(10)
2.3 水化学相关的基本概念 .....	(14)
2.3.1 化合物和混合物 .....	(14)
2.3.2 溶液和溶解度 .....	(14)
2.3.3 pH 值 .....	(19)
2.3.4 电导率 .....	(24)
2.3.5 氧化和还原 .....	(25)
复习题 .....	(29)
<b>第 3 章 腐蚀及其防护</b> .....	(30)
3.1 概述 .....	(30)
3.1.1 核电厂常见的材料腐蚀 .....	(30)
3.1.2 腐蚀机制 .....	(32)
3.1.3 腐蚀的防护方法 .....	(32)
3.2 PWR 结构材料的腐蚀 .....	(33)
3.2.1 锆合金 .....	(33)
3.2.2 不锈钢 .....	(36)
3.2.3 镍基合金 .....	(40)
3.3 腐蚀产物的运动和活化 .....	(42)
3.3.1 腐蚀产物的转移和沉积 .....	(42)
3.3.2 腐蚀产物的活化和分布 .....	(43)

复习题 .....	(43)
<b>第 4 章 化学补偿控制</b> .....	(44)
4.1 可溶性中子吸收剂 .....	(44)
4.1.1 化学补偿控制特点 .....	(44)
4.1.2 可溶性中子吸收剂的选择 .....	(45)
4.1.3 硼酸在 PWR 中的使用 .....	(46)
4.1.4 用于反应性控制的硼浓度计算 .....	(47)
4.2 硼酸和硼酸水溶液的性能 .....	(50)
4.2.1 硼酸的腐蚀性能 .....	(50)
4.2.2 硼酸和硼酸水溶液的物理化学性能 .....	(50)
4.2.3 硼酸水溶液的热工水力性能 $f_0$ .....	(58)
4.2.4 含硼冷却剂的净化和废物处理 .....	(58)
复习题 .....	(58)
<b>第 5 章 冷却剂辐射化学</b> .....	(59)
5.1 水的辐射化学 .....	(59)
5.1.1 射线与物质的相互作用 .....	(59)
5.1.2 水的辐照分解 .....	(60)
5.1.3 影响水辐射分解的因素 .....	(63)
5.2 水冷堆中水的辐射化学 .....	(64)
5.2.1 纯水在反应堆中的分解和合成 .....	(64)
5.2.2 含硼水在反应堆中的辐射分解 .....	(65)
5.2.3 加氢抑制水的辐射分解 .....	(66)
复习题 .....	(68)
<b>第 6 章 辐射场控制</b> .....	(69)
6.1 PWR 中的裂变产物 .....	(69)
6.1.1 裂变产物向冷却剂的转移 .....	(69)
6.1.2 裂变产物在水溶液中的行为 .....	(74)
6.1.3 燃料元件的破损监测 .....	(77)
6.2 PWR 中的辐射场来源 .....	(79)
6.3 辐射场的化学控制 .....	(81)
6.3.1 冷却剂化学对辐射场的控制 .....	(81)
6.3.2 系统设备的清洗与去污 .....	(84)
复习题 .....	(88)
<b>第 7 章 一、二回路水的 pH 控制</b> .....	(90)
7.1 一、二回路水 pH 控制的意义和作用 .....	(90)

7.2	一回路 pH 控制剂	(91)
7.2.1	一回路 pH 控制剂的选择	(91)
7.2.2	氢氧化锂 pH 控制剂	(93)
7.2.3	氢氧化铵 pH 控制剂	(97)
7.3	二回路 pH 控制剂	(99)
7.3.1	二回路 pH 控制剂的选择	(99)
7.3.2	磷酸盐 pH 控制剂	(99)
7.3.3	氢氧化铵 pH 控制剂	(100)
7.3.4	乙醇胺 pH 控制剂	(101)
	复习题	(101)
<b>第 8 章 PWR 一、二回路系统的水化学准则</b> (102)		
8.1	引言	(102)
8.2	PWR 一回路系统的水化学准则	(102)
8.2.1	控制目标	(102)
8.2.2	控制方法	(103)
8.2.3	控制限值、行动准则和纠正措施	(103)
8.2.4	确定水化学技术参数的依据	(108)
8.2.5	一回路水质技术规范(限值)	(109)
8.3	PWR 二回路系统的水化学准则	(111)
8.3.1	控制目标	(111)
8.3.2	控制限值、行动基准和纠正措施	(111)
8.3.3	确定水化学技术参数的依据	(116)
8.3.4	WANO 化学指标 CPI	(119)
8.3.5	二回路水质技术规范(限值)	(119)
8.4	蒸汽发生器的化学管理	(122)
8.4.1	蒸汽发生器的保养	(122)
8.4.2	蒸汽发生器传热管的腐蚀损伤	(123)
8.4.3	蒸汽发生器二次侧的水化学	(124)
	复习题	(126)
<b>第 9 章 PWR 水处理工艺和系统</b> (128)		
9.1	PWR 水处理工艺(概述)	(128)
9.1.1	水处理工艺的目的	(128)
9.1.2	PWR 水质净化的重要性	(128)
9.2	离子交换	(130)
9.2.1	离子交换树脂及其物理性能、化学性能和工艺性能	(130)
9.2.2	离子交换机制	(134)
9.2.3	核级离子交换树脂	(134)
9.2.4	离子交换技术在 PWR 中的应用	(136)

9.3 过滤 .....	(137)
9.3.1 微孔过滤 .....	(137)
9.3.2 磁过滤 .....	(138)
9.4 蒸发 .....	(138)
9.4.1 蒸发工艺 .....	(138)
9.4.2 PWR 废水的蒸发 .....	(138)
9.5 冷却剂的除气 .....	(139)
9.5.1 化学除氧 .....	(139)
9.5.2 物理除气 .....	(140)
9.6 膜分离方法 .....	(140)
9.6.1 反渗透 .....	(141)
9.6.2 电渗析 .....	(142)
9.7 PWR 水处理系统 .....	(142)
9.7.1 冷却剂循环净化系统的流程、系统组成及其功能 .....	(142)
9.7.2 化学添加和容积控制系统 .....	(146)
9.7.3 硼回收系统 .....	(149)
复习题 .....	(152)
<b>第 10 章 PWR 水化学分析和监测 .....</b>	<b>(153)</b>
10.1 分析化学在 PWR 水质控制与监测中的重要作用概述 .....	(153)
10.2 化学分析简述 .....	(153)
10.2.1 化学分析 .....	(154)
10.2.2 重量法分析 .....	(155)
10.2.3 滴定法分析 .....	(155)
10.3 仪器分析简述 .....	(156)
10.3.1 仪器分析的特点 .....	(156)
10.3.2 光学分析法 .....	(156)
10.3.3 电化学分析法 .....	(160)
10.3.4 分离分析法 .....	(160)
10.3.5 其他仪器分析法 .....	(162)
10.4 分析化学技术在 PWR 水质监测中的应用 .....	(164)
10.4.1 水质等监测的管理对策 .....	(164)
10.4.2 取样 .....	(165)
10.4.3 水质控制项目的分析方法 .....	(167)
复习题 .....	(172)
<b>索引 .....</b>	<b>(174)</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>(178)</b>

# 第 1 章 绪 论

压水堆(PWR)以高温高压水作为冷却剂和慢化剂。一方面随着反应堆运行堆年的增加,水化学问题会相继表现出来,例如放射性污染问题、设备和材料的腐蚀问题、水质的保证及控制问题和放射性污染的处理以及防护问题等;另一方面随着运行堆年的增加,水化学对维护反应堆的运行安全和提高核电厂可利用率的重要性就更加突出。

水化学从两个方面影响压水堆的运行安全:

- 1) 影响核电厂含有放射性的屏障的安全性;
- 2) 影响堆芯以外的辐射场的放射性积累,从而影响工作人员经受的辐射剂量。

这些因素相互联系,为了保证系统的完整性必须定期进行检查和维护,而维修又是职业性地经受照射的主要原因。水化学的良好控制可以使上述两个问题对核电厂的不利影响大为减少,从而改善核电厂的安全性。良好的水化学控制是确保屏障的完整性的重要手段,保护屏障的完整性问题涉及两个方面:

- 1) 导致安全屏障直接破坏的腐蚀过程;

2) 削弱安全屏障性能的腐蚀,即使在运行期间屏障的完整性是完好的,但也可使其在瞬间发生破裂,使事故逐步升级。

## 1.1 屏障的完整性

为防止放射性裂变产物释放到环境,核电厂设有四道屏障:芯块、燃料包壳、一回路系统(反应堆内壳)和安全壳(包括废物处理系统)。水化学可以影响前三道屏障。在燃料棒中燃料芯块和装有芯块的锆合金包壳形成了防止功率运行期间产生的裂变产物释放到环境的两道屏障。因此,保护燃料包壳的完整性是核电厂运行安全的主要目标。锆合金可能受腐蚀、氢脆和由于腐蚀产物在其表面的沉积,传热效率下降致使包壳表面温度升高而引起锆合金的抗腐蚀性能下降和恶化。一回路系统是防止活化腐蚀产物、裂变产物和燃料包壳破损而泄漏的放射性物质的又一道屏障。以上这些屏障的完整性都与水化学有关。水化学对反应堆压力容器不会有重大影响,但水质对压水堆的蒸汽发生器的完整性却有重大影响。目前虽还没有出现由于水化学因素导致一回路侧结构材料的开裂,但人们仍关注一回路的水化学对燃料包壳、一回路压力边界的完整性和一回路放射性积累的影响。压水堆蒸汽发生器的完整性一方面受到一回路水质好坏的重大影响,而另一方面二回路水化学控制不善引起的耗蚀、点蚀、凹陷和晶间腐蚀等严重问题也导致了許多核电厂蒸汽发生器的失效。因此,保持压水堆二回路良好的水质也是非常重要的。水化学不会影响作为反应堆安全屏障的安全壳系统。在第 3 章将详细讨论锆合金包壳和结构材料与水化学的相容性问题。

## 1.2 辐射场及其控制

保证良好的工作环境,降低辐射场剂量是所有核电厂的目标,必须使工作人员所受的辐射照射剂量保持在合理可行尽量低的水平,以便减少其对人员身体健康的影响。工作人员所受的辐射剂量是由在辐射区所停留的时间和所受的辐射强度决定的。可以利用远距离控制设备的操作和减少维护修理,来减少工作人员所受辐照的时间。

本节简要论述减少反应堆堆芯以外的辐射场的途径,尤其是人员在检查和维护工作期间导致遭受更大剂量的辐射场是压水堆的蒸汽发生器。在反应堆燃料元件包壳破损率很小或无破裂的正常运行工况下,堆芯以外的辐射场的90%放射性强度是由活化的腐蚀产物所贡献。这些腐蚀产物来自堆内部件或冷却剂系统的腐蚀、磨损表面,并由主冷却剂载运到堆芯,在堆芯内被活化,随后沉积在堆芯以外的系统表面上。钴同位素( $^{58}\text{Co}$ 和 $^{60}\text{Co}$ )是辐射场的主要贡献者。在新的核电厂正通过控制材料中钴杂质的含量和尽可能减少表面硬化钴基合金的使用来更多地减少钴源。水化学控制是降低辐射场形成速率的唯一办法。在反应堆首次启动前和运行期间表面的预处理和仔细地控制水化学是很重要的。在运行期间和停堆时,良好地控制水化学是必须的,以减少整个燃料循环周期内钴同位素的释放、转移和沉积。核电厂运行经验表明,水质控制不好的核电厂,通常具有较高的辐射场。

许多在良好水化学控制情况下运行的压水堆核电厂,年集体剂量较低,而在水化学控制比较差的情况下运行的核电厂,通常具有较高的辐射场,其年集体剂量甚至达到水化学控制情况良好的核电厂的几倍(在第6章将详细讨论水化学对辐射场的影响)。

## 1.3 水化学控制

### (1) 主要水化学控制

- 1) 恰当的化学处理(如 pH 值和氧含量的控制);
- 2) 使用高纯补给水,严格控制水质质量标准;
- 3) 一回路和二回路水有效的净化;
- 4) 防止杂质的进入;
- 5) 在冷却剂系统中使用化学药品的纯度应具有质量保证;
- 6) 在核电厂控制区使用化学物质,应遵守核安全条例;
- 7) 为获得优质水需要有性能良好的补给水除盐系统,冷凝器的高度完整性,避免氧气漏入,有效的主冷却剂和冷凝水净化系统;
- 8) 核电厂管理部门均有制定水质监测、腐蚀监督和辐射场报警等管理法规及对策。

### (2) 主要水化学问题

每个核电厂的设计都存在其自身的潜在问题。例如,人们特别关心离子交换树脂,氧和无机杂质( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ )进入一回路,因为杂质( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ )和氧(冷却水在堆芯辐射分解生成)的联合作用可能对材料有很大的损害,同时更加关注二回路水中的 $\text{Cl}^-$ ,氧的含量,因为这是构成蒸汽发生器传热管应力腐蚀开裂的主要化学因素。另外,为控制堆芯的反应性,在整个燃料周期要求冷却剂中的硼酸浓度随燃料的燃耗加深而降低。因此,使压水堆一回路系统

的水化学复杂化了。这需要向主冷却剂中添加碱化剂,通常是氢氧化锂、氢氧化铵和氢氧化钾。如果维持 pH 值恒定,碱化剂的浓度要随硼酸浓度作相应的改变。还必须保持主冷却剂中有一定氢含量 $[25 \text{ ml(STP)}/(\text{kgH}_2\text{O})]$ ,以便抑制水的辐射分解,否则,辐射分解产生的氧将导致材料局部腐蚀和在燃料包壳表面上将有大量腐蚀产物的沉积。压水堆二回路系统大都采用维持碱性的二回路给水的全挥发性处理法。这里必须特别注意的是要减少能迅速促使蒸汽发生器传热管产生严重腐蚀的氧、氯化物、硫酸盐等杂质的进入。

为了通过控制腐蚀和辐射场来改进反应堆运行安全,要求核电厂管理部门制定监测水化学、腐蚀和辐射场以及需要时采取纠正措施的法规、程序 and 对策。

综上所述,适宜的水化学控制技术在确保核电厂安全稳定运行中具有重要作用。

## 复 习 题

1. 简述水化学控制的主要内容和水化学在压水堆核电厂安全运行中的重要作用。
2. 水化学主要在哪几个方面影响压水堆核电厂的安全运行和核电厂可利用率?

# 第 2 章 水化学基础理论

## 2.1 元素周期表

元素周期表是化学元素周期律的概括表达形式。化学元素周期律的发现是化学史上最重要的事件之一。元素周期律对化学元素性质的研究和物质结构学说的进一步发展都起了非常重要的作用。

### 2.1.1 元素和元素的周期表

目前,已知的化学元素达到 112 种,其中 94 种存在于自然界中,18 种是人工制造的。在这些元素中,绝大多数是金属元素,共 90 种,非金属元素 22 种。为了书写上的方便,采用一定的符号来表示各种元素,叫做元素符号。112 种化学元素中 109 种有了中文、英文名称和相应的元素符号。每种元素符号通常用它的拉丁文原名的第一字母(要用大写)。如氧元素用“O”表示,碳元素用“C”表示。如果两种元素的拉丁文原名第一字母相同,为了区别起见,就再在它后面附加一个字母,但第二个字母必须小写。例如锆元素用“Zr”表示,镍元素用“Ni”表示。书写元素符号注意字母大写和小写的规定,否则会造成错误。例如:“Co”是元素钴的符号,“CO”是一氧化碳的化学式。

俄国化学家门捷列夫(Менделеев)总结大量前人的研究成果,并根据相对原子质量大小顺序、比较各元素原子化学性质相似相异后,最早提出了元素周期规律性或周期律。在门捷列夫把所有的元素按相对原子质量的增大顺序排列之后,他发现每经过规律性的间隔总会出现化学上相似的元素,即在元素系列中,它们的许多性质都周期性地重复出现。他深信,在所有的化学元素之间应存在着一种规律性的联系,这种联系将所有的元素联成一个整体。他得出结论,元素的相对原子质量应当是它们分类的基础。门捷列夫最先发表了简单而明确的按元素周期相似性排列起来的表,称作元素周期表。单质的性质及元素化合物的形态和性质,与元素相对原子质量的数值成周期性的关系。现代元素周期表是长式的,叫维尔纳长式周期表(见图 2-1)。

### 2.1.2 元素的周期性

随着化学元素相对原子质量的增加,它们性质的改变不是朝着一个方向不断地进行下去,而是具有周期性。经过一定数量的元素以后,好像又返回到原来的性质,然后在一定程度上又按同样的顺序再一次重复前面那些元素的性质,但在质和量两方面则有某些差异。

门捷列夫把在其范围内性质循序改变的一行元素,称之为周期。例如,从锂到氩或从钠到氫的一行八个元素。如果把这两个周期写成一上一下,使得锂的下面是钠,而氩的下面是氫,就得到下面的元素排列:



能级组 或周期	能级组 内状态	I A	II A	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B	IB	II B	IIIA	IVA	V A	VIA	VIIA	VIIIA	元素数																												
1	1s	1 H s <sup>1</sup>		21 Sc s <sup>2</sup> d <sup>1</sup>	22 Ti s <sup>2</sup> d <sup>2</sup>	23 V s <sup>2</sup> d <sup>3</sup>	24 Cr s <sup>1</sup> d <sup>5</sup>	25 Mn s <sup>2</sup> d <sup>5</sup>	26 Fe s <sup>2</sup> d <sup>6</sup>	27 Co s <sup>2</sup> d <sup>7</sup>	28 Ni s <sup>2</sup> d <sup>8</sup>	29 Cu s <sup>1</sup> d <sup>10</sup>	30 Zn s <sup>2</sup> d <sup>10</sup>	31 Ga p <sup>2</sup>	32 Ge p <sup>2</sup>	33 As p <sup>3</sup>	34 Se p <sup>4</sup>	35 Br p <sup>5</sup>	36 Kr p <sup>6</sup>	10 He s <sup>2</sup>	2																									
2	2s, 2p	3 Li s <sup>1</sup>	4 Be s <sup>2</sup>	11 Na s <sup>1</sup>	12 Mg s <sup>2</sup>	19 K s <sup>1</sup>	20 Ca s <sup>2</sup>	37 Rb s <sup>1</sup>	38 Sr s <sup>2</sup>	55 Cs s <sup>1</sup>	56 Ba s <sup>2</sup>	87 Fr s <sup>1</sup>	88 Ra s <sup>2</sup>	57-71 s <sup>2</sup> df	72 Hf [f <sup>14</sup> ]s <sup>2</sup> d <sup>2</sup>	73 Ta s <sup>2</sup> d <sup>3</sup>	74 W s <sup>2</sup> d <sup>4</sup>	75 Re s <sup>2</sup> d <sup>5</sup>	76 Os s <sup>2</sup> d <sup>6</sup>	77 Ir s <sup>2</sup> d <sup>7</sup>	78 Pt s <sup>1</sup> d <sup>9</sup>	79 Au s <sup>1</sup> d <sup>10</sup>	80 Hg s <sup>2</sup> d <sup>10</sup>	81 Tl [f <sup>14</sup> s <sup>2</sup> d <sup>10</sup> ]p <sup>1</sup>	82 Pb p <sup>2</sup>	83 Bi p <sup>3</sup>	84 Po p <sup>4</sup>	85 At p <sup>5</sup>	86 Rn p <sup>6</sup>	13 Al [s <sup>2</sup> ]p <sup>1</sup>	14 Si p <sup>2</sup>	15 P p <sup>3</sup>	16 S p <sup>4</sup>	17 Cl p <sup>5</sup>	18 Ar p <sup>6</sup>	5 B [s <sup>2</sup> ]p <sup>1</sup>	6 C p <sup>2</sup>	7 N p <sup>3</sup>	8 O p <sup>4</sup>	9 F p <sup>5</sup>	10 Ne p <sup>6</sup>	8				
3	3s, 3p			39 Y s <sup>2</sup> d <sup>1</sup>	40 Zr s <sup>2</sup> d <sup>2</sup>	41 Nb s <sup>1</sup> d <sup>4</sup>	42 Mo s <sup>1</sup> d <sup>5</sup>	43 Tc s <sup>2</sup> d <sup>5</sup>	44 Ru s <sup>1</sup> d <sup>7</sup>	45 Rh s <sup>1</sup> d <sup>8</sup>	46 Pd s <sup>0</sup> d <sup>10</sup>	47 Ag s <sup>1</sup> d <sup>10</sup>	48 Cd s <sup>2</sup> d <sup>10</sup>	49 In [s <sup>2</sup> d <sup>10</sup> ]p <sup>1</sup>	50 Sn p <sup>2</sup>	51 Sb p <sup>3</sup>	52 Te p <sup>4</sup>	53 I p <sup>5</sup>	54 Xe p <sup>6</sup>	13 Al [s <sup>2</sup> ]p <sup>1</sup>	14 Si p <sup>2</sup>	15 P p <sup>3</sup>	16 S p <sup>4</sup>	17 Cl p <sup>5</sup>	18 Ar p <sup>6</sup>	8																				
4	4s, 3d, 4p			57-71 s <sup>2</sup> df	72 Hf [f <sup>14</sup> ]s <sup>2</sup> d <sup>2</sup>	73 Ta s <sup>2</sup> d <sup>3</sup>	74 W s <sup>2</sup> d <sup>4</sup>	75 Re s <sup>2</sup> d <sup>5</sup>	76 Os s <sup>2</sup> d <sup>6</sup>	77 Ir s <sup>2</sup> d <sup>7</sup>	78 Pt s <sup>1</sup> d <sup>9</sup>	79 Au s <sup>1</sup> d <sup>10</sup>	80 Hg s <sup>2</sup> d <sup>10</sup>	81 Tl [f <sup>14</sup> s <sup>2</sup> d <sup>10</sup> ]p <sup>1</sup>	82 Pb p <sup>2</sup>	83 Bi p <sup>3</sup>	84 Po p <sup>4</sup>	85 At p <sup>5</sup>	86 Rn p <sup>6</sup>	31 Ga [s <sup>2</sup> d <sup>10</sup> ]p <sup>1</sup>	32 Ge p <sup>2</sup>	33 As p <sup>3</sup>	34 Se p <sup>4</sup>	35 Br p <sup>5</sup>	36 Kr p <sup>6</sup>	18																				
5	5s, 4d, 5p			89-103 s <sup>2</sup> df	104 Rf s <sup>2</sup> d <sup>2</sup>	105 Db s <sup>2</sup> d <sup>3</sup>	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Uuu	112 Uub	49 In [s <sup>2</sup> d <sup>10</sup> ]p <sup>1</sup>	50 Sn p <sup>2</sup>	51 Sb p <sup>3</sup>	52 Te p <sup>4</sup>	53 I p <sup>5</sup>	54 Xe p <sup>6</sup>	49 In [s <sup>2</sup> d <sup>10</sup> ]p <sup>1</sup>	50 Sn p <sup>2</sup>	51 Sb p <sup>3</sup>	52 Te p <sup>4</sup>	53 I p <sup>5</sup>	54 Xe p <sup>6</sup>	18																				
6	6s, 4f, 5d, 6p			89-103 s <sup>2</sup> df	104 Rf s <sup>2</sup> d <sup>2</sup>	105 Db s <sup>2</sup> d <sup>3</sup>	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Uuu	112 Uub	49 In [s <sup>2</sup> d <sup>10</sup> ]p <sup>1</sup>	50 Sn p <sup>2</sup>	51 Sb p <sup>3</sup>	52 Te p <sup>4</sup>	53 I p <sup>5</sup>	54 Xe p <sup>6</sup>	49 In [s <sup>2</sup> d <sup>10</sup> ]p <sup>1</sup>	50 Sn p <sup>2</sup>	51 Sb p <sup>3</sup>	52 Te p <sup>4</sup>	53 I p <sup>5</sup>	54 Xe p <sup>6</sup>	18																				
7	7s, 5f, 6d, ...			89-103 s <sup>2</sup> df	104 Rf s <sup>2</sup> d <sup>2</sup>	105 Db s <sup>2</sup> d <sup>3</sup>	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Uuu	112 Uub	49 In [s <sup>2</sup> d <sup>10</sup> ]p <sup>1</sup>	50 Sn p <sup>2</sup>	51 Sb p <sup>3</sup>	52 Te p <sup>4</sup>	53 I p <sup>5</sup>	54 Xe p <sup>6</sup>	49 In [s <sup>2</sup> d <sup>10</sup> ]p <sup>1</sup>	50 Sn p <sup>2</sup>	51 Sb p <sup>3</sup>	52 Te p <sup>4</sup>	53 I p <sup>5</sup>	54 Xe p <sup>6</sup>	18																				
元素分区		s 区											d 区											ds 区											p 区											
价电子构型		ns <sup>1-2</sup>											(n-1)d <sup>1-9</sup> s <sup>1-2</sup>											(n-1)d <sup>10</sup> s <sup>1-2</sup>											ns <sup>2</sup> np <sup>1-6</sup>											

f 区: (n-2) f<sup>1-14</sup>(n-1)d<sup>0-2</sup>ns

57-71 镧系元素	57 La d <sup>1</sup>	58 Ce f <sup>1</sup> d <sup>1</sup>	59 Pr f <sup>3</sup>	60 Nd f <sup>4</sup>	61 Pm	62 Sm f <sup>6</sup>	63 Eu f <sup>7</sup>	64 Gd d <sup>1</sup> f <sup>7</sup>	65 Tb f <sup>9</sup>	66 Dy f <sup>10</sup>	67 Ho f <sup>11</sup>	68 Er f <sup>12</sup>	69 Tm f <sup>13</sup>	70 Yb f <sup>14</sup>	71 Lu d <sup>1</sup> f <sup>14</sup>
89-103 锕系元素	89 Ac d <sup>1</sup>	90 Th d <sup>2</sup>	91 Pa d <sup>1</sup> f <sup>2</sup>	92 U d <sup>1</sup> f <sup>3</sup>	93 Np f <sup>4</sup> d <sup>1</sup>	94 Pu f <sup>6</sup>	95 Am f <sup>7</sup>	96 Cm d <sup>1</sup> f <sup>7</sup>	97 Bk f <sup>9</sup>	98 Cf f <sup>10</sup>	99 Es f <sup>11</sup>	100 Fm f <sup>12</sup>	101 Md (f <sup>13</sup> )	102 No (f <sup>14</sup> )	103 Lr (d <sup>1</sup> f <sup>14</sup> )

图 2-1 元素周期表