



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定



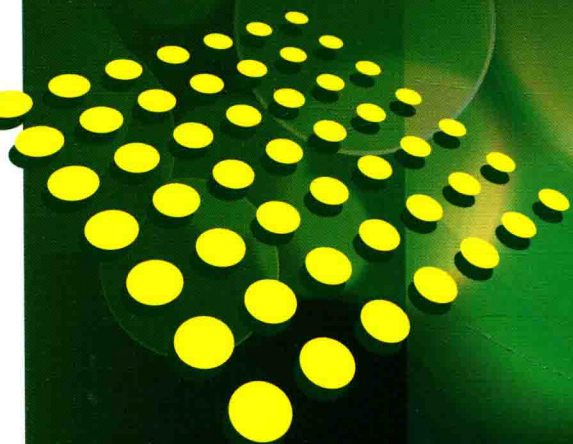
医药卫生类专业适用

无机化学

Inorganic Chemistry

郭小仪 黄晓英 主编

郭幼红 副主编



化学工业出版社



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定
医药卫生类专业适用

无机化学

第二版

郭小仪 黄晓英 主 编
郭幼红 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本教材主要介绍了原子组成、核外电子的运动状态和排布、同位素和核反应的概念及应用、元素周期律和周期表、化学键等物质结构基础理论知识,溶液和胶体溶液、化学反应速率和化学平衡、氧化还原和电极电势、电解质溶液、同离子效应和缓冲溶液、配位化合物等知识,常见金属、非金属及其化合物,人体中元素的分类、必需元素的生理功能及某些有害微量元素,环境污染的概念、主要类型及其危害、环境化学的主要研究领域和内容、绿色化学的特点和原则等。

书后附有溶液的配制、化学反应速率和化学平衡、电解质溶液、氧化还原和电极电势、同离子效应和缓冲溶液、醋酸电离常数的测定、粗盐的提纯、硫酸铜结晶水的测定,共 8 个实验。

本书面向高中后三年制高职医学检验、药学和医学营养等专业学生,初中后五年制高职相关专业学生也可选用。

图书在版编目 (CIP) 数据

无机化学/郭小仪,黄晓英主编. —2 版. —北京:化学工业出版社,2015.8

“十二五”职业教育国家规划教材 医药卫生类专业适用
ISBN 978-7-122-24415-4

I. ①无… II. ①郭… ②黄… III. ①无机化学-
高等职业教育-教材 IV. ①O61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 138935 号

责任编辑: 窦 臻 陶艳玲
责任校对: 吴 静

文字编辑: 糜家铃
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 10 $\frac{3}{4}$ 彩插 1 字数 259 千字 2015 年 10 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 24.00 元

版权所有 违者必究

编写说明

无机化学、有机化学和分析化学是高职高专医药卫生类相关专业的专业基础课,本系列教材包括《无机化学》、《有机化学》、《分析化学》三个分册。自出版以来,以“贴近专业、贴近学生、贴近生活”、体现“浅、宽、新”为特色,受到广大师生的欢迎,第二版均被教育部立项为“十二五”职业教育国家规划教材。该系列教材第二版在“不断完善、不断优化”和“服务专业、学以致用”的思想指导下,在原有教材基础上进行了完善和优化,并结合专业需要适当增加了部分内容。

根据“化学直接为医学相关类各专业课程奠定必要的理论和实践基础;同时体现化学在人们日常生活中指导科学饮食、预防疾病、环境保护等方面的重要作用”的课程定位,在教材修订过程中,注重理论与实践的联系,突出职业能力的培养,弱化其理论性;依据专业课和岗位的需求,筛选教材内容;依据认知规律和学生的实际情况对教材内容进行组织编排。从专业角度出发,以相应的职业资格为导向,吸纳新知识、新技术、新方法。围绕必需的知识点组织编排教材内容,内容简明扼要,便于学生接受,充分体现高职教学的特点,体现以学生为主的教学理念。

本系列教材适用于高中后三年制高职高专医学检验、临床检验、卫生检验、药学、中药、药物制剂和医学营养等专业学生;初中后五年制高职相关专业学生也可选用。

本系列教材的三个分册既有一定的联系,在内容编排上又具有各自的完整性与独立性,各学校可以整体配套使用,也可以根据不同专业课程设置的需单独选择使用。

教材编写组

2014年2月

前言

FOREWORD

本教材自2010年出版后,历时4年多,经多所高职高专院校的使用,受到众多好评,并被教育部评审为“十二五”职业教育国家规划教材。为了更好地发挥国家级规划教材的作用,我们对全书内容进行了修订和补充。

这次再版修改了一些不够准确和严谨的地方,增加了介绍环境污染和环境化学的内容,补充了不少与专业紧密相关的例子。例如在第二章中将“乳浊液在医学上的应用”改为“悬浊液和乳浊液在医学上的应用”,增加举例胃镜检查用的“钡餐”;在第七章配位化合物中增加了血红素的结构介绍等,其他补充这里不一一列举说明。

新版教材共有十章,第一章介绍了原子的组成、原子核外电子的运动状态和排布、同位素和核反应的概念及应用、元素周期律和周期表,化学键、离子键、共价键的概念、特点及形成条件,分子的极性判断、分子间作用力和氢键及其对物质性质的影响等物质结构基础理论知识。第二章至第七章主要介绍溶液和胶体溶液、化学反应速率和化学平衡、氧化还原和电极电势、电解质溶液、同离子效应和缓冲溶液、配位化合物等知识。第八章和第九章分别介绍了常见金属和非金属及其化合物,注重于列举医学上常见的物质,并介绍了人体中元素的分类、必需元素的生理功能及某些有害微量元素。第十章介绍了环境污染的概念、主要类型及其危害、环境化学的主要研究领域和内容、绿色化学的特点和原则等。

书后附有8个实验,分别是溶液的配制、化学反应速率和化学平衡、电解质溶液、氧化还原和电极电势、同离子效应和缓冲溶液,醋酸电离常数的测定、粗盐的提纯、硫酸铜结晶水的测定。实验内容注重基本操作规范化,注重与专业有关的基本技能训练,以此培养学生观察、分析、解决问题的能力及认真、求实、严谨的科学态度;培养学生的团队协作精神;为后续专业课程的学习奠定实践基础。为教学方便,本书配有PPT课件及练习题参考答案,使用本教材的学校可以与化学工业出版社联系(cipedu@163.com),免费索取。

本书再版坚持原书的指导思想,在整体上以简明为特点,基本内容覆盖面较宽,各学校可根据不同专业的课程标准和教学课时数,对教材的授课和实验内容进行选取。教材适用于高中后三年制高职医学检验、药学和医学营养等专业学生,初中后五年制高职医学检验、药学和医学营养等专业学生也可选用。

本教材由苏州卫生职业技术学院郭小仪、黄晓英任主编,泉州医学高等专科学校郭幼红任副主编,泉州医学高等专科学校罗婉妹、扬州职业大学孙成、承德护理职业学院董丽萍、鞍山师范学院附属卫生学校范春红参加了编写。在编写过程中,得到了许多学校同行专家和临床老师的大力帮助和支持,在此表示衷心感谢!

限于编者水平,疏漏和不当之处在所难免,恳请使用本书的师生批评指正,以便不断修改,日臻完善。

编者

2015年1月

第一版前言

目录

随着高等职业教育的普及与深入发展,作为高职高专类医学检验、药学、医学营养等专业的一门重要的基础课程——无机化学课程建设也面临着新的挑战。高职高专类的医学检验、药学、医学营养等专业,既不同于本科类专业,也不同于中专类专业,与它们相比,不仅学生的知识水平发生了变化,教学的内容和要求也有了重要变化。针对这一情况,我们在江苏省卫生厅卫生职业技术教育研究课题“三年制检验、药学、营养专业化学类课程标准定位与教学方法研究”成果的基础上,成立了由具有多年丰富教学经验的一线教师组成的《无机化学》教材编写组,对职业教育课程模式进行全面和深入的调查,在充分了解相关医药专业的现状、水平、发展趋势,以及后续专业课程对无机化学课程需求的基础上,依据无机化学课程标准,编写了本教材。

本教材的编写降低了无机化学理论的难度,减少了元素化学的内容,主要介绍物质结构、溶液和胶体溶液、化学平衡、氧化还原、电解质溶液、缓冲溶液、配位化合物、常见非金属元素及其化合物和常见金属元素及其化合物等知识。教材后面附有溶液的配制、电解质溶液、同离子效应和缓冲溶液等实验内容。除了在编写说明中介绍的特点外,本教材还设计了“主副篇”框架,“主篇”是对学生的基本要求,严格按照课程标准精选内容,适当增加与专业有关的知识,删减偏深的化学理论知识,使教材更贴近目前学生的水平;“副篇”以“知识拓展”的形式延伸“主篇”的内容,供学生选读和教师选用,以满足一部分学有余力的学生的需要。

无机化学课程一般在新生入学后第一学期开设,各学校可根据不同专业的课程标准和教学课时数,对教材内容进行选择讲授。

本教材由苏州卫生职业技术学院郭小仪、泉州医学高等专科学校郭幼红任主编,苏州卫生职业技术学院黄晓英任副主编,苏州卫生职业技术学院宋素英、泉州医学高等专科学校罗婉妹、鞍山师范学院附属卫生学校范春红参加了编写工作。

为方便教学,本书配有PPT课件以及思考与练习参考答案,使用本教材的学校可以与化学工业出版社联系(cipedu@163.com),免费索取。

教材在编写过程中,得到了苏州卫生职业技术学院检验药学系的老师和临床专家的大力帮助和支持,在此表示衷心感谢!对本书所引用文献资料的作者表示深深的谢意!

限于编者水平,疏漏和不当之处在所难免,恳请使用本书的师生批评指正,以便不断修改,更臻完善。

编者

2010年4月

目 录

CONTENTS

第一章 物质结构	1
第一节 原子结构	1
一、原子的组成	1
二、同位素	2
三、原子核外电子的运动状态	3
四、原子核外电子的排布	6
第二节 元素周期律和元素周期表	9
一、元素周期律	9
二、元素周期表	11
三、元素周期律和元素周期表的应用	16
第三节 化学键	16
一、离子键	16
二、共价键	17
第四节 分子的极性	19
一、极性共价键和非极性共价键	19
二、极性分子和非极性分子	19
第五节 分子间作用力和氢键	20
一、分子间作用力	20
二、氢键	21
目标测试	22
第二章 溶液和胶体溶液	23
第一节 溶液组成的表示方法	23
一、溶液组成的表示方法	24
二、溶液的配制、稀释和有关计算	26
三、溶液浓度的换算	28
第二节 分散系	29
一、概念及分类	29
二、三类分散系的特点	29
三、悬浊液和乳浊液在医学上的应用	30
第三节 稀溶液的依数性	30
一、溶液的蒸气压降低	30
二、溶液的沸点升高	31
三、溶液的凝固点降低	31
四、溶液的渗透压	33

第四节 胶体溶液	35
一、胶体溶液的性质	35
二、胶团的结构	37
三、胶体溶液的稳定性和聚沉	39
四、高分子化合物溶液	40
目标测试	42

第三章 化学反应速率和化学平衡

第一节 化学反应速率	43
一、化学反应速率的概念及表示方法	43
二、影响化学反应速率的因素	44
三、有效碰撞理论	47
第二节 化学平衡	48
一、化学平衡的概念	48
二、化学平衡常数	49
三、化学平衡的移动	51
目标测试	55

第四章 电解质溶液

第一节 弱电解质的电离平衡	56
一、强电解质和弱电解质	57
二、弱电解质的电离度和电离平衡	58
三、多元弱酸的分步电离	61
第二节 酸碱理论	62
一、酸碱电离理论	62
二、酸碱质子理论	62
三、酸碱电子理论	63
第三节 水的电离和溶液的 pH	63
一、水的电离	63
二、溶液的 pH	64
三、酸碱指示剂	66
第四节 离子反应和盐类的水解	68
一、离子反应	68
二、盐类的水解	69
第五节 难溶电解质的沉淀溶解平衡	72
一、沉淀溶解平衡和溶度积	72
二、沉淀的生成和溶解	74
三、溶度积规则的应用	75
目标测试	76

第五章 氧化还原和电极电势	78
第一节 氧化还原反应的基本概念	78
一、氧化数	78
二、氧化还原	79
三、氧化剂和还原剂	81
四、氧化还原反应方程式的配平	83
五、氧化还原反应的应用	85
第二节 原电池和电极电势	86
一、原电池	86
二、电极电势	87
三、电极电势的应用	91
目标测试	93
第六章 缓冲溶液	95
第一节 同离子效应	95
第二节 缓冲溶液	96
一、缓冲溶液的概念	96
二、缓冲溶液的组成	96
三、缓冲作用的原理	96
四、缓冲溶液 pH 的计算	98
五、缓冲溶液的配制	101
六、缓冲溶液在医药上的意义	102
目标测试	103
第七章 配位化合物	105
第一节 配合物	105
一、配合物的概念	105
二、配合物的组成	106
三、配合物的命名	107
四、配合物的价键理论	107
五、配合物的性质	108
六、配合物的稳定性和配位平衡	108
七、配合物的应用	109
第二节 螯合物	110
一、螯合物的概念	110
二、螯合物的形成条件	110
三、医学上常见的螯合剂	110
目标测试	112

第八章 常见非金属元素及其化合物	113
第一节 卤族元素	113
一、卤素的单质	114
二、卤化氢及氢卤酸	116
三、卤化物	117
四、卤素的含氧酸及其盐	119
五、类卤化合物	120
第二节 氧族元素	121
一、氧族简介	121
二、氧的单质及其化合物	122
三、硫及其化合物	123
第三节 氮和磷的化合物	126
一、氨和铵盐	126
二、亚硝酸及医学上常见的亚硝酸盐	126
三、硝酸及医学上常见的硝酸盐	127
四、磷酸及医学上常见的磷酸盐	128
目标测试	129
第九章 常见金属元素及其化合物	130
第一节 金属的通性	130
一、金属键	130
二、金属的物理性质	131
三、金属的化学性质	131
第二节 碱金属和碱土金属	131
一、碱金属和碱土金属的概述	131
二、碱金属和碱土金属的性质与用途	132
三、碱金属和碱土金属的氧化物、氢氧化物及盐类	132
第三节 水的净化	135
一、饮用水的净化	135
二、硬水及其软化	135
三、水的纯化	136
第四节 人体中的化学元素	136
一、人体中元素的分类	136
二、必需元素的生理功能	137
三、某些有害微量元素	139
目标测试	140
第十章 环境污染和环境化学	142
第一节 环境污染	142
一、概述	142
二、主要环境污染与人体健康	143

第二节 环境化学	144
一、概述	145
二、绿色化学	146
目标测试	147
实验部分	148
实验一 溶液的配制	148
实验二 化学反应速率和化学平衡	149
实验三 电解质溶液	150
实验四 氧化还原和电极电势	152
实验五 同离子效应和缓冲溶液	155
实验六 醋酸电离常数的测定	157
实验七 粗盐的提纯	159
实验八 硫酸铜结晶水的测定	160
参考文献	162

第一章 物质结构

学习目标

1. 熟悉原子的组成、同位素的概念及应用。
2. 熟悉原子核外电子的运动状态和排布。
3. 了解核反应及其应用、描述核外电子运动的 4 个量子数。
4. 掌握元素周期律和周期表。
5. 掌握化学键、离子键、共价键的概念、特点及形成条件。
6. 熟悉分子极性的判断。
7. 了解分子间作用力和氢键及其对物质性质的影响。

自然界的物质种类繁多，其性质各不相同，而物质在性质上的差异是由物质的内部结构不同引起的。因此要了解物质的性质、深刻地认识物质世界的变化规律，就必须进一步了解物质的内部结构。

第一节 原子结构

一、原子的组成

19 世纪初，英国科学家道尔顿 (J. Dalton) 提出了原子论，认为物质是由不可再分的原子组成，以致 19 世纪的人们几乎都认为原子是不能再分的。直到 19 世纪末，电子和放射性的发现，才使人们舍弃原子不能再分的传统观念，打开了原子结构的大门。20 世纪初，英国物理学家卢瑟福 (E. Rutherford) 利用 α 粒子散射实验确认了原子核的存在，建立了原子结构的行星模型：电子绕原子核运动，好似太阳系中的行星运动。通过众多科学家的不断探索，使人们认识了原子的内部结构：原子 (atom) 是由带正电荷的原子核和核外带负电荷的电子构成。原子核位于原子的中心，电子在核外作高速运动。由于原子核所带的正电量和核外电子所带的负电量相等，因此，整个原子是电中性的。原子很小，其直径约为 10^{-10}m ，而原子核的直径更小，约为原子直径的万分之一，而它的体积只占原子体积的几千亿分之一。

原子核 (atomic nucleus) 由质子和中子构成。每个质子 (proton) 带 1 个单位的正电荷，中子 (neutron) 是电中性的，因此，核电荷数由质子数决定。按核电荷数由小到大的顺序给元素编号，所得的序号称为该元素的原子序数 (atomic number)。显然，原子序数在数值上等于这种原子的核电荷数，在原子中存在以下关系：

$$\text{原子序数} = \text{核电荷数} = \text{核内质子数} = \text{核外电子数}$$

例如, 6 号碳元素, 碳原子的核电荷数为 6, 原子核内有 6 个质子, 核外有 6 个电子。

质子的质量为 $1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 中子的质量为 $1.6748 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。由于质子、中子的质量都很小, 计算不方便, 所以通常用它们的相对质量进行计算。相对原子质量衡量的标准为 ^{12}C 原子质量的 $\frac{1}{12}$, 其质量为 $1.6606 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。质子和中子对它的相对质量分别为

1.007 和 1.008, 取近似整数值为 1。由于电子的质量很小, 约为质子质量的 $\frac{1}{1836}$, 所以在

原子的质量中, 电子的质量可以忽略不计, 因此原子的质量主要集中在原子核上。将原子核内所有的质子和中子的相对质量取近似整数值相加, 所得的数值称为原子的质量数 (mass number)。用符号 A 表示质量数, 用符号 N 表示中子数, 用符号 Z 表示质子数, 则:

$$\text{质量数}(A) = \text{质子数}(Z) + \text{中子数}(N)$$

如以 ${}^A_Z\text{X}$ 代表一个质量数为 A 、质子数为 Z 的原子, 则构成原子的粒子间的关系可以表示如下:

$$\text{原子} ({}^A_Z\text{X}) \begin{cases} \text{原子核} \begin{cases} \text{质子 } Z \text{ 个} \\ \text{中子 } (A-Z) \text{ 个} \end{cases} \\ \text{核外电子 } Z \text{ 个} \end{cases}$$

例如, ${}^{23}_{11}\text{Na}$ 表示钠原子的质量数为 23, 质子数为 11, 中子数为 12, 核外电子数为 11, 钠是第 11 号元素; ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ 表示氯原子的质量数为 37, 质子数为 17, 中子数为 20, 核外电子数为 17, 氯是第 17 号元素。

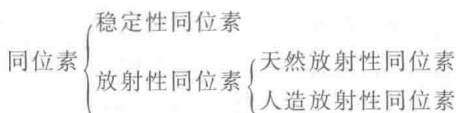
原子失去电子成为阳离子, 原子得到电子成为阴离子。因此, 同种元素的原子和离子间的区别只是核外电子数目不同。例如, ${}^{23}_{11}\text{Na}^+$ 表示带一个单位正电荷的钠离子的质量数为 23, 质子数为 11, 中子数为 12, 核外电子数为 10, 钠是第 11 号元素; ${}^{37}_{17}\text{Cl}^-$ 表示带一个单位负电荷的氯离子的质量数为 37, 质子数为 17, 中子数为 20, 核外电子数为 18。

二、同位素

元素是具有相同核电荷数 (即质子数) 的同一类原子的总称。具有一定数目质子和一定数目中子的一种原子称为核素。同种元素原子都具有相同的质子数。若在同种元素的原子核里含有不同数目的中子时, 就形成多种核素。如氢元素有三种不同的原子, 即有三种核素, 分别为氕 (${}^1_1\text{H}$)、氘 (${}^2_1\text{H}$)、氚 (${}^3_1\text{H}$), 它们的原子核内都只有 1 个质子, 但中子数不同, 分别为 0、1、2, 是质量不同的三种氢原子。像这种质子数相同而中子数不同的同种元素的一组核素互称为同位素 (isotope)。

大多数元素都有同位素, 氢元素的同位素有 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$; 碳元素的同位素有 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{13}_6\text{C}$ 和 ${}^{14}_6\text{C}$, 其中 ${}^{12}_6\text{C}$ 就是人们把它质量的 $\frac{1}{12}$ 作为相对原子质量标准的碳原子, 通常表示为 ^{12}C ; 碘元素的同位素有 ${}^{127}_{53}\text{I}$ 、 ${}^{131}_{53}\text{I}$; 钴元素的同位素有 ${}^{59}_{27}\text{Co}$ 、 ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 等。同一元素的各种同位素原子, 它们的核电荷数 (质子数) 相同, 核外电子数相同, 而中子数不同, 质量数不同, 它们物理性质有差异, 但化学性质几乎完全相同。

同位素可分为稳定性同位素和放射性同位素两类。放射性同位素能自发地放出不可见的 α 、 β 或 γ 射线, 这种性质称为放射性。稳定性同位素没有放射性。放射性同位素又分为天然放射性同位素和人造放射性同位素:



放射性同位素的原子放出的射线，可以用灵敏的探测仪器测定出它们的踪迹，所以放射性同位素的原子又称为“示踪原子”。放射性同位素在科学研究和医学上被广泛应用。例如， $^{131}_{53}\text{I}$ 用于甲状腺功能亢进的诊断和治疗； $^{60}_{27}\text{Co}$ 放出的射线能深入组织，对癌细胞有破坏作用； $^{14}_6\text{C}$ 含量的测定可推算文物或化石的“年龄”；用放射性同位素作示踪原子，用于研究药物的作用机制，药物的吸收和代谢等。近年来，放射性同位素的应用得到迅速发展，如放射性同位素扫描，已成为诊断脑、肝、肾、肺等病变的一种安全简便的方法。



知识拓展

核 反 应

核反应 (nuclear reaction)，是指粒子（如中子、光子、 π 介子等）或原子核与原子核之间的相互作用引起的各种变化。

核反应通常分为四类：衰变、粒子轰击、裂变和聚变。前者为自发发生的核转变，而后三种为人工核反应（即用人工方法进行的非自发核反应）。

核反应有如下特点：

(1) 连锁反应 某些核反应存在连锁反应的现象，如： ^{235}U 和中子的核反应，只要有一个中子轰击 ^{235}U ，就会放出 3 个中子，3 个中子再去轰击 ^{235}U 就会生成 9 个中子，这样连续下去，在几微秒的时间里，就使反应进行得非常剧烈而放出巨大的能量，具有这种特点的反应，称之为连锁反应。原子弹的爆炸能够如此剧烈，就是由于发生了连锁反应。

(2) 伴随核辐射 在 ^{235}U 与中子的核反应中，如果反应不密封，产生的中子会以光速射向周围环境，形成辐射。以光速运动的微小粒子都能产生辐射。辐射看不见、摸不着。但是可以通过仪器测得。少量的辐射对人体不产生影响，而且人类还可利用辐射为人类造福，例如医院用 X 射线给病人做胸透，放疗是治疗癌症比较常用的方法，其原理就是利用辐射来杀死癌细胞。但是辐射量一多，就会对人体产生伤害。比如 X 射线可以用于检查疾病，但是如果孕妇照 X 射线，就有可能导致婴儿畸形或基因变异。同样，接受放疗的病人会有脱发、恶心、乏力等副反应出现。剂量再大一点的辐射，还会使成人产生基因变异，诱发白血病（血癌）、皮肤癌等疾病，大量的辐射还会烧伤甚至烧死一切有生命的物质。

(3) 高效

(4) 清洁、无污染 核能是清洁、无污染的新能源，以法国为例，1980~1986 年间，法国核电占总发电量的比例由 24% 上升至 70%，在此期间法国总发电量增加 40%，而排放的含硫物质降低 9%，尘埃减少 36%。大气质量明显改善。

三、原子核外电子的运动状态

(一) 电子云

电子是质量很小的粒子，它像光一样，既具有波动性，又具有粒子性。电子的运动规律与宏观世界物体的运动规律完全不同，电子在原子核外运动没有固定的运动轨迹，人们不可

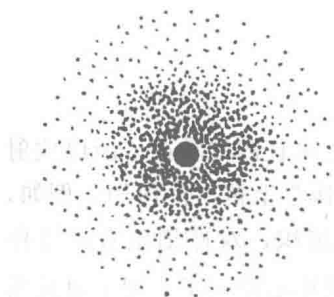


图 1-1 氢原子的电子云示意

图中小黑点密集的地方,表示电子出现的概率大,黑点稀疏的地方,表示电子出现的概率小,其形象犹如笼罩在原子核周围的一层带负电荷的云雾,故称为电子云 (electron cloud)。但要注意,氢原子核外只有一个电子,所以决不能将电子云图中每一个小黑点理解为一个电子。电子云只是原子核外电子行为统计结果的一种形象化的比喻。

图像表明氢原子的电子云呈球形对称,在核附近电子出现的概率大,在离核 53pm ($1\text{pm}=10^{-12}\text{m}$) 附近的一薄层球壳内电子出现的概率最大,而在球壳以外的地方,电子出现的概率极小。因此把电子出现概率相等的地方连接起来,作为电子云的界面,这个界面所包括的空间范围称为原子轨道。由此可见,原子轨道实际上就是电子经常出现的区域,与宏观的轨道有着完全不同的含义。

(二) 核外电子的运动状态

电子在原子核外一定区域内作高速运动,都具有一定的能量。实验证明,电子离核越近,能量越低;离核越远,能量越高。电子离核的远近,反映出电子能量的高低。对于多电子原子,其核外电子的运动状态比较复杂,需要从电子层、电子亚层、电子云的伸展方向和电子的自旋四个方面来描述。

(1) 电子层 在含有多电子的原子里,电子的能量并不相同。能量低的电子,通常在离核近的区域运动;能量较高的电子,通常在离核较远的区域运动。根据电子的能量差异和通常运动区域离核的远近不同,可以将核外电子分成不同的电子层:

电子层 (n)	1	2	3	4	5	6	7
电子层符号	K	L	M	N	O	P	Q

电子层 n 值越大,电子离核越远,电子的能量越高。因此,电子层数 n 不仅表示电子离核距离的远近,也是决定电子能量高低的主要因素。

必须指出,电子层并不是指电子固定地在某些地方运动,只不过表示电子在这些地方出现的概率较大而已。

(2) 电子亚层和电子云的形状 科学研究发现,在同一电子层中,电子的能量还稍有差别,电子云的形状也不相同。根据这个差别,又可以把一个电子层分成一个或几个亚层,分别用 s 、 p 、 d 、 f 等符号来表示。每一电子层中所包含的亚层数等于其电子层数。

$n=1$ 有一个亚层,称 $1s$ 亚层;

$n=2$ 有两个亚层,称 $2s$ 亚层和 $2p$ 亚层;

$n=3$ 有三个亚层,称 $3s$ 亚层、 $3p$ 亚层和 $3d$ 亚层;

$n=4$ 有四个亚层,称 $4s$ 亚层、 $4p$ 亚层、 $4d$ 亚层和 $4f$ 亚层;

.....

s 亚层的电子称为 s 电子, p 亚层的电子称为 p 电子, 以此类推。在同一电子层中, 亚层电子的能量按 s、p、d、f 的顺序依次增大, 即 $E_{ns} < E_{np} < E_{nd} < E_{nf}$ 。由此可知, 电子亚层是决定电子能量高低的次要因素。

在多电子的原子中的各个电子之间存在相互作用, 研究某个外层电子的运动状态时, 必须同时考虑到核及其他电子对它的作用。由于其他电子的存在, 往往减弱了原子核对外层电子的作用力, 从而使多电子原子的电子能级产生交错现象, 从第三电子层起就出现能级交错现象。例如, 3d 的能量似乎应该低于 4s, 而实际上 $E_{3d} > E_{4s}$ 。按能量最低原理, 电子在进入核外电子层时, 不是排完 3p 就排 3d, 而是先排 4s, 排完 4s 才排 3d。由于能级交错, 在次外层未达最大容量之前, 已出现了最外层, 而且最外层未达最大容量时, 又进行次外层电子的填充。所以原子最外层和次外层电子数一般达不到最大容量。

不同的亚层其电子云的形状也不相同。s 亚层的电子云是以原子核为中心的球形, p 亚层的电子云为哑铃形。d 亚层、f 亚层的电子云形状比较复杂, 这里不作介绍。

(3) 电子云的伸展方向 电子云不仅有一定的形状, 而且在空间有一定的伸展方向。s 电子云是球形对称的, 在空间各个方向上伸展的程度相同 (见图 1-2)。p 电子云在空间有三种互相垂直的伸展方向 (见图 1-3)。d 电子云有五种伸展方向, f 电子云有七种伸展方向。

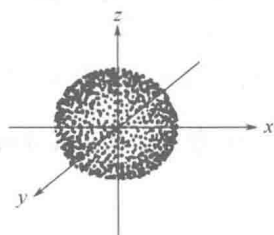


图 1-2 s 电子云

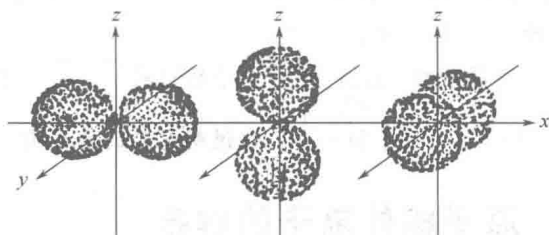


图 1-3 p 电子云的三种伸展方向

把在一定电子层上、具有一定形状和伸展方向的电子云所占据的空间称为一个原子轨道 (orbital), 则 s、p、d、f 四个亚层就分别有 1、3、5、7 个原子轨道。这样各电子层可能有的最多轨道数如下:

电子层 (n)	亚层	原子轨道数
n=1	1s	$1=1^2$
n=2	2s、2p	$1+3=4=2^2$
n=3	3s、3p、3d	$1+3+5=9=3^2$
n=4	4s、4p、4d、4f	$1+3+5+7=16=4^2$
n		n^2

由此可知, 每个电子层中可能有的最多原子轨道数为 n^2 。

(4) 电子的自旋 原子中的电子在围绕原子核旋转的同时, 还在作自旋运动。电子自旋有两种状态, 即顺和反两种方向。通常用向上箭头 “ $\uparrow$ ” 和向下箭头 “ $\downarrow$ ” 表示。实验证明, 自旋方向相同的两个电子相互排斥, 不能在同一个原子轨道内运动。自旋方向相反的两个电子相互吸引, 能在同一个原子轨道内运动。由此可得, 每个原子轨道最多可以容纳自旋方向相反的两个电子。

综上所述, 原子核外每个电子的运动状态都要由它所处的电子层、电子亚层、电子云在空间的伸展方向和自旋状态四个方面来决定。



知识拓展

四个量子数

原子核外电子的运动状态比较复杂,不仅可以用电子层、电子亚层、电子云在空间的伸展方向和自旋状态来描述,还可用四个量子数(quantum number)来描述。这四个量子数是主量子数(n)、角量子数(l)、磁量子数(m)和自旋量子数(m_s)。它们的物理意义和取值如下。

(1) 主量子数(n)——电子层 描述电子在核外空间出现概率最大的区域离核的远近。主量子数 n 可以取非零的任意正整数,即1、2、3、 $\cdots$ 、 n ,每个 n 值对应着一个电子层,所以 n 也可称为电子层数。

(2) 角量子数(l)——电子亚层 角量子数 l 决定电子云的形状(或原子轨道的形状),也表示电子亚层。角量子数 l 的取值受主量子数的限制,可取0、1、2、 $\cdots$ 、 $(n-1)$,共 n 个整数值。

(3) 磁量子数(m)——电子云的伸展方向 描述原子轨道在空间的伸展方向。磁量子数 m 的取值受角量子数的限制, m 可取0、 ± 1 、 ± 2 、 $\cdots$ 、 $\pm l$ 等整数,即 m 可以取 $+l \sim -l$ 并包括0在内的整数值,每一个数值代表一个原子轨道。因此,每一电子亚层所具有的原子轨道的总数为 $(2l+1)$ 个。

(4) 自旋量子数(m_s)——电子的自旋 描述电子的自旋方向。自旋量子数 m_s 可能的取值只有两个,即 $m_s = +\frac{1}{2}$ 和 $-\frac{1}{2}$ 。这说明电子的自旋有两种相反方向,即顺和反两种方向。

四、原子核外电子的排布

(一) 原子核外电子的排布规律

人们根据原子光谱实验和量子力学理论,总结出原子核外电子的排布遵循以下三个规律。

(1) 泡利(Pauli)不相容原理 1925年奥地利物理学家泡利(W. Pauli, 1900~1958)提出,每个原子轨道最多只能容纳2个自旋方向相反的电子。或者说,在同一原子中,没有运动状态完全相同的电子存在,这就是泡利不相容原理。

根据这个原理,可以推算出各电子层中最多可容纳的电子数为 $2n^2$ 。1~4电子层可容纳电子的最大数目见表1-1。

表 1-1 1~4 电子层可容纳电子的最大数目

电子层(n)	K(1)			L(2)			M(3)			N(4)			
电子亚层	s	s	p	s	p	d	s	p	d	f			
亚层中的轨道数	1	1	3	1	3	5	1	3	5	7			
亚层中的电子数	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14			
每个电子层中可容纳电子的最大数目($2n^2$)	2	8		18			32						

(2) 能量最低原理 在不违背泡利不相容原理的前提下,核外电子总是尽先占有能量最低的轨道,只有当能量最低的轨道占满后,电子才依次进入能量较高的轨道,这个规律称为能量最低