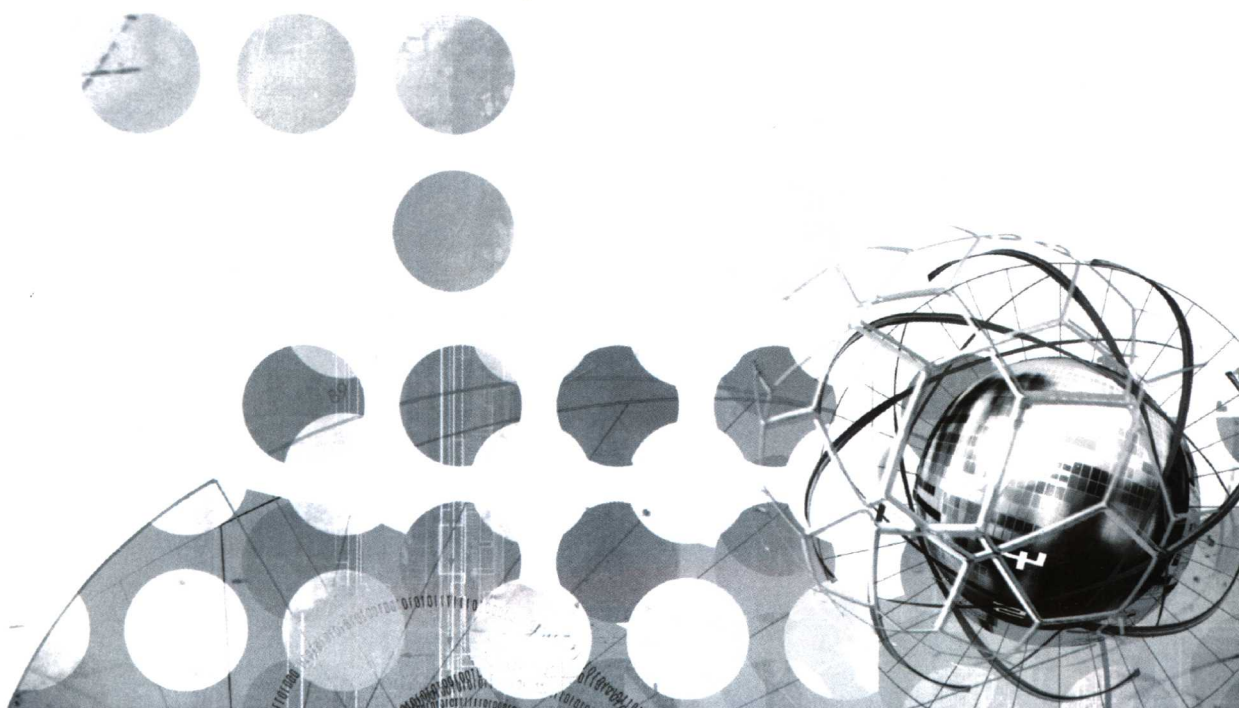



21 世纪普通高等教育规划教材




无机及分析化学

WUJI JI FENXI HUAXUE

主编 ● 赵金安
徐霞



 郑州大学出版社

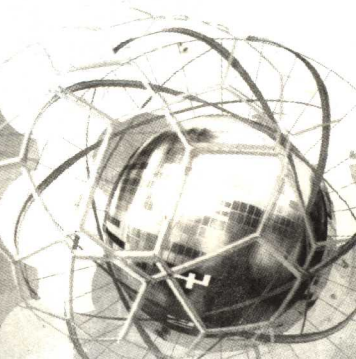
21 世纪普通高等教育规划教材

无机及分析化学

WUJI JI FENXI HUAXUE

主编 ○ 赵金安
徐霞

郑州大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

无机及分析化学/赵金安,徐霞主编. —郑州:郑州大学出版社,2007.9

ISBN 978 - 7 - 81106 - 711 - 8

I. 无… II. ①赵…②徐… III. ①无机化学 - 高等学校 - 教材②分析化学 - 高等学校 - 教材 IV. 061 065

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 133661 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:邓世平

全国新华书店经销

黄委会设计院印刷厂印制

开本:787 mm × 1 092 mm

印张:21.5

字数:512 千字

版次:2007 年 9 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371 - 66966070

1/16

印次:2007 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978 - 7 - 81106 - 711 - 8 定价:34.00 元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

编委名单

BIANWEIMINGDAN

主 编 赵金安 徐 霞

副主编 张慧勤 张红岭 潘 玮
刘萃红

编 委 (按姓氏笔画排序)

马步伟 王艺军 刘萃红

朱玉玲 张红岭 张慧勤

陈 燕 赵金安 赵振新

柳 兵 徐 霞 潘 玮

内容提要

NEIRONGTIYAO

本书按照教学大纲要求,将无机和分析化学内容融合在一起。内容包括溶液和胶体、化学热力学和化学动力学初步、化学平衡、原子和分子结构与化学键、定量分析概论和化学分析的四大平衡以及光度分析法,每章末有思考题和习题。

本书可作为本科化工类、环境类、制药技术类、生物技术类、医学类、农林类、材料类、国防公安类等相关专业的教材使用,也可作为以上各相关专业成人教育、职业培训教材使用,同时可作为各相关专业参考书。

前言

QIANYAN

随着社会的飞速发展和科技的进步,使得化学在各个相关学科如农学、生物学、医学和环境学等学科中的地位日益提高。为使学习这些学科的学生适应科技发展,化学工作者不断更新教学内容,为此,我们编写了无机及分析化学一书。该书综合了以往的无机化学和分析化学两门基础化学课程的内容,包括基本化学原理、物质结构、滴定分析、四大化学平衡以及仪器分析等。

鉴于无机化学和分析化学学科的迅速发展,本教材在充实内容的基础上,适当增加了发展比较成熟的新方法和新技术的相关内容,以实现教材的先进性,使学生能够了解并学习学科发展的新进展。另外,编者参考了已出版的相关教材,并引用了其中的一些图表,主要参考书列于书后,在此特向所有参考图书的作者表示感谢!

本教材主编为一直战斗在教学一线的赵金安老师和徐霞老师,副主编为张慧勤老师,张红岭老师,潘玮老师,刘萃红老师。绪论和第十章由赵金安编写;第七章、第十三章由徐霞编写;第十一章、第十二章由张慧勤和潘玮编写;第八章、第九章由张红岭和陈燕编写;第三章由柳兵和朱玉玲编写;第二章、第四章、第五章由刘萃红、马步伟和赵振新编写;第六章由王艺军编写。

限于编者水平,书中难免有不妥之处,恳请专家和读者批评指正。

编者

2007年6月

目录

MULU

第一章 绪论	1
一、化学研究的对象和重要作用	1
二、无机及分析化学课程的性质、任务与学习方法	3
三、无机及分析化学的任务	4
第二章 溶液和胶体	5
第一节 分散系	5
一、分散系的概念	5
二、分散系的分类	5
第二节 溶液的浓度	7
一、溶液	7
二、溶液的组成	7
三、溶液的浓度	7
第三节 稀溶液的依数性	9
一、蒸气压下降	9
二、沸点升高	12
三、凝固点下降	13
四、渗透压	14
第四节 强电解质溶液	16
第五节 胶体溶液	18
一、溶胶的基本性质	18
二、溶胶的稳定性和聚沉	22
三、高分子化合物溶液简述	23
第三章 原子结构与元素周期律	28
第一节 原子结构	28
第二节 核外电子运动的量子力学表示方法	29

一、氢原子光谱和波尔理论	29
二、电子的波粒二象性	31
三、海森堡测不准原理	33
四、波函数和薛定谔方程	33
第三节 核外电子排布规律	42
一、屏蔽效应和钻穿效应	42
二、鲍林近似能级图	43
三、鲍利不相容原理	43
四、能量最低原理	44
五、洪特规则	45
第四节 元素周期律和元素周期表	46
一、元素周期律	46
二、元素周期表	46
三、元素的周期性变化	48
第四章 化学键与分子结构	55
第一节 离子键理论	55
一、离子键的形成	55
二、离子键的特性	57
三、离子的特征	58
四、离子键的强度	60
第二节 共价键	61
一、价键理论	61
二、杂化轨道理论	68
三、价层电子对互斥理论	71
四、分子轨道理论	74
第三节 分子间力和氢键	80
一、分子间力	80
二、氢键	84
第四节 金属键	85
一、自由电子理论	86
二、金属能带理论	86
第五节 晶体结构	87
一、晶体的特征	87
二、晶体的基本概念	87
三、晶体的基本类型	88
第五章 化学热力学初步	94
第一节 热力学的几个基本概念	94
一、体系和环境	94

二、状态和状态性质	95
三、过程和途径	96
四、热力学能	98
五、热和功	98
第二节 热力学第一定律	98
第三节 热化学	99
一、化学反应的热效应	99
二、反应热的计算	101
第四节 热力学第二定律	104
一、自发过程	104
二、状态函数——焓和热力学第二定律	104
三、化学反应方向和限度的 ΔG 判据	107
第六章 化学平衡	111
第一节 化学平衡与平衡常数	111
一、化学反应的可逆性	111
二、化学平衡	111
第二节 标准平衡常数 K^\ominus 与化学反应的标准自由能变 ($\Delta_r G_m^\ominus$) 的关系	116
一、标准平衡常数与化学反应方向	116
二、化学反应等温方程	116
第三节 化学平衡的移动	119
一、浓度对化学平衡的影响	119
二、压力对化学平衡的影响	120
三、温度对化学平衡的影响	122
第四节 化学平衡计算	123
一、基本概念	123
二、计算	123
三、利用实验数据求经验平衡常数 (K_c) 及相对平衡常数 (K_r)	124
第七章 化学反应动力学基础	128
第一节 化学反应速率	128
一、反应速率概念	128
二、反应速率的基本理论	131
第二节 影响反应速率的因素	134
一、浓度对反应速率的影响	134
二、温度对反应速率的影响	138
第八章 定量分析概论	143
第一节 定量分析概述	143
第二节 定量分析的误差	144
一、真值、平均值和总体平均值	144

二、准确度和精密度	145
三、误差的分类	149
第三节 有效数字及其计算规则	151
一、有效数字	151
二、有效数字的修约规则	152
三、有效数字的运算	152
第四节 分析数据的统计处理	153
一、随机误差的正态分布	153
二、随机误差的区间概率	154
三、 t 分布与平均值的置信区间	157
四、显著性检验	159
五、数据的评价	161
第五节 滴定分析	163
一、几个基本概念	164
二、滴定分析法的特点和分类	164
三、滴定分析法对化学反应的要求和滴定方式	165
四、标准溶液与基准物质	166
第九章 酸碱平衡与酸碱滴定法	168
第一节 电解质的电离	168
一、弱电解质的电离平衡	168
二、强电解质溶液理论简介	172
第二节 酸碱理论	173
第三节 水溶液中的电离平衡	175
一、水的离子积和 pH	175
二、共轭酸碱对 K_a 和 K_b 的关系	176
第四节 酸碱溶液 pH 的计算	177
一、强酸强碱溶液	177
二、一元弱酸弱碱溶液	177
第五节 缓冲溶液	181
一、缓冲作用原理	181
二、缓冲溶液 pH 的计算	182
三、缓冲容量	183
四、缓冲溶液的选择和配制	184
第六节 酸碱滴定法及其应用	185
一、酸碱指示剂	185
二、酸碱滴定曲线和指示剂的选择	187
三、滴定分析法有关计算	194
第十章 配位化合物和配位滴定法	198

第一节 配合物的基本概念	198
一、配合物的定义	198
二、配合物的组成	198
三、配合物的种类	199
四、配合物的中文命名法	200
五、配位化合物的空间结构	201
第二节 价键理论	202
一、价键理论(VB)	202
二、价键理论的应用	206
第三节 晶体场理论	207
一、晶体场理论要点	208
二、晶体场理论的应用	215
三、晶体场理论缺陷	217
第四节 配位(络合)平衡	217
一、配合物的平衡常数	217
二、配位平衡的移动	219
第五节 络合滴定法概述	220
一、络合滴定中的滴定剂	220
二、乙二胺四乙酸及其钠盐	221
三、金属离子-EDTA 络合物的特点	223
第六节 络合滴定中的副反应和条件形成常数	223
一、络合滴定中的副反应和副反应系数	223
二、MY 络合物的条件形成常数	225
第七节 EDTA 滴定曲线	226
第八节 络合滴定指示剂	229
一、金属离子指示剂的作用原理	229
二、金属指示剂变色点的 pM 值	230
三、金属指示剂在使用中存在的问题	230
四、常用金属指示剂简介	231
第九节 终点误差和准确滴定的条件	233
一、终点误差	233
二、直接准确滴定金属离子的条件	233
第十节 络合滴定的方式和应用	233
一、直接滴定法	233
二、返滴定法	234
三、置换滴定法	234
四、间接滴定	235
第十一章 沉淀平衡和沉淀滴定法	236

第一节 溶解度和溶度积	236
一、溶度积	236
二、溶解度与溶度积的关系	237
三、溶度积与条件溶度积	238
第二节 沉淀的生成和溶解	238
一、溶度积规则	238
二、溶度积规则及其应用	239
第三节 重量分析法	247
第四节 沉淀的形成以及影响沉淀纯度的因素	249
一、沉淀的类型	249
二、沉淀形成的过程	250
三、影响沉淀纯度的因素	251
第五节 沉淀条件的选择及有机沉淀剂的应用	253
一、晶形沉淀的条件	254
二、无定形沉淀的条件	254
三、均匀沉淀法	255
四、有机沉淀剂的应用*	255
第六节 沉淀析出后的处理	256
一、沉淀的过滤和洗涤	256
二、沉淀的烘干或灼烧	257
第七节 重量分析的计算和应用示例	258
一、重量分析结果的计算	258
二、应用示例	259
第八节 沉淀滴定法	260
一、概述	260
二、确定终点的方法	261
三、沉淀滴定法应用实例	264
第十二章 氧化还原平衡和氧化还原滴定法	267
第一节 氧化还原反应	267
一、氧化还原反应的概念	267
二、氧化数	268
第二节 电极电势	268
一、原电池	268
二、电极电势	269
三、电极电势和吉布斯自由能的关系	272
第三节 影响电极电势的因素——能斯特方程	273
一、浓度对电极电势的影响——能斯特方程及其应用	273
二、温度对电极电势的影响	274

三、溶液酸度对电极电势的影响	274
四、形成沉淀和配合物的影响	274
第四节 电极电势的应用	275
一、判断氧化剂和还原剂的相对强弱	275
二、判断氧化还原反应的方向	276
三、判断氧化还原反应的程度	277
第五节 氧化还原滴定法	279
一、概述	279
二、氧化还原滴定法原理	279
三、氧化还原滴定法的指示剂	287
第六节 氧化还原滴定的应用	290
一、 KMnO_4 法	290
二、 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 法	293
三、 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 法的应用示例	293
四、碘量法	294
第十三章 吸光光度法	299
第一节 物质对光的选择性吸收	300
一、光的基本性质	300
二、物质对光的选择性吸收	301
第二节 光吸收的基本定律	303
一、朗伯—比耳定律	303
二、偏离朗伯—比耳定律的因素	305
第三节 吸光光度法的仪器	307
一、分光光度计的主要部件	307
二、吸光度的测量原理	309
三、分光光度计的类型	310
第四节 吸光光度法分析条件的选择	312
一、显色反应及其条件的选择	312
二、吸光光度法的测量误差及测量条件的选择	317
第五节 吸光光度法的应用	320
一、定性分析	320
二、定量分析	320
三、络合物组成和酸碱离解常数的测定	323
四、其他方面的应用	326
参考文献	329
元素周期表	330

第一章 绪 论

自从有了人类,化学便与人类结下了不解之缘。钻木取火,用火烧煮食物,烧制陶器,冶炼青铜器和铁器,等等,都是化学技术的应用。正是这些应用,极大地促进了当时社会生产力的发展,成为人类进步的标志。今天,化学作为一门基础学科,在科学技术和社会生活的方方面面正起着越来越大的作用。

世界是由物质组成的,物质是客观存在的东西,它是现在和未来工程师的实际工作对象,也是化学研究的对象。

一、化学研究的对象和重要作用

1. 化学是研究化学物质变化的科学

众所周知,世界是由物质组成的,形形色色的物质处于永恒的运动之中。自然科学就是以客观存在的物质世界为考察对象,以它的基本属性——运动作为研究的内容。目前,人们把客观存在的物质划分为实物和场(电磁场、引力场等)两种基本形态。化学研究的对象主要是实物。就物质的构造而言,大至宏观的天体,小到微观的基本粒子,其间可分为若干层次。化学研究的主要对象是单质、化合物与原子、分子和离子等客观存在的东西,也常称为物质。

物质运动的形式,目前主要分为机械运动、物理运动、化学运动、生物运动和社会运动等。化学研究的内容主要是物质的化学运动,即物质的化学变化,化学变化的过程实际上为分子、原子或离子等因核外电子运动状态的改变而发生分解和化合等变化的过程,同时伴有物理变化如光、热、电、颜色、物态等的发生。因此,在研究物质化学变化的同时,也必须注意研究伴随化学变化的相关的变化。对这些相关变化的研究,有时会反过来促进化学学科自身的发展。如研究化学反应产生的电流现象,导致电化学的发展;对化学反应热的研究,又产生热化学,等等。

化学变化之后,原物质变成了新物质,但不涉及原子核的变化。由于物质的化学变化与物质的化学性质相关,而物质的化学性质与物质的组成和结构密切相关。因此,首先是研究物质本身的组成、结构及其性质,其次是研究物质发生化学变化的外界条件,最终还要对变化本身的规律进行研究,即反应能否发生、反应程度如何,有哪些因素影响反应的发生及程度,如何进行化学反应等,并综合理解和应用。

综上所述,化学是一门在原子、分子或离子层次上的研究:

- ① 物质的组成、结构和性质的关系;
- ② 物质的组成、结构变化的内在联系及外界变化条件;
- ③ 伴随着整个变化的效应等。

2. 化学的重要作用

从宇宙进化的层次结构来看,化学是研究化学进化这一层次的科学。因此,化学不会消亡。人类认识世界、认识物质,总是从自己直接感知开始,并借助于仪器和辩证思维不断深入扩展的。物质处于不断地运动之中,各层次物质运动都有相应于其特点的理论。人类对物质运动的认识没有完结,随着时代的前进而不断更新。在19世纪和20世纪上半叶,化学研究的前沿之一是发现新元素及其化合物,因此元素周期律是化学研究的一个极为重要的规律。20世纪三大科学发现(相对论、量子力学、DNA双螺旋结构),使化学工作者在理论物理与化学交叉学科有多项重大突破,对20世纪人类科技和物质文明进步产生了巨大影响。量子化学从20世纪30年代初的理论奠基到90年代末在计算技术与应用上的成熟,经历了将近70年。量子力学的辉煌使理论物理学家18次共25人荣获诺贝尔物理奖。这是几代杰出理论化学家不懈努力的结果,得益于计算机和计算技术的巨大进步。在90年代行将结束之际,化学理论和计算研究的巨大进展,致使整个化学正在经历一场革命性的变化。Kohn和Pople是其中的两位最优秀代表。1998年诺贝尔化学奖的颁布是计算量子化学在化学和整个自然科学中的重要地位被确立和获得普遍承认的重要标志。量子力学颁奖典礼上对他们研究成果的评价是“这项突破被广泛地公认为近一二十年来化学学科中最重要的成果之一”。从20世纪下半叶起,化学研究的主要任务就转变为合成新分子。在过去的几十年中,新分子和化合物的数目从110万种增加到2000万种以上。在这些新分子中,有许多是人们感兴趣的分子,例如能使血管扩张、传递神经信息的“信使分子”——NO,此外,1985年合成的 C_{60} ,1991年合成的碳纳米管等都是非常重要的分子。21世纪的化学,有的中国科学院院士预言还要飞速发展,并在研究对象的更新方面有3个特征:①在数量上,新分子和新化合物将以指数函数的速度增长,大概每隔10年翻一番;②在质量上,将更加重视人类需要的功能分子和功能材料;③将不再满足合成新分子,而要把分子扩展组装成分子材料、分子器件、分子机器,例如碳纳米管分子导线、分子开关、分子磁体、分子电路、分子计算机等。

现在多数科学家预言21世纪是生命科学的世纪,但现代生命科学须在分子层次及以上水平来研究。在分子水平上的研究方法之一就是化学方法。如果有了深厚的化学理论、方法和实验基础,再去从事分子生物学和生命科学的研究,将会取得很大成功,这在中外的著名生物学家中有不少例子。

另外,化学是社会迫切需要的实用科学。化学与人类社会的衣、食、住、行、能源、信息、材料、国防、环境保护、医药卫生、资源利用等都有密切的关系。例如在化学合成新材料方面,已经合成出比头发丝还细的石英光导纤维,用它在通讯中代替铜线,一根光导纤维就可供2.5万人同时通话而互不干扰。1987年发现 $YBa_2Cu_3O_x$ 一类氧化物显示超导性的温度为95 K,这意味着在液氮温度下实现超导性已成为可能,这样就有可能把电能进行长距离输送而无损失。人体中微量元素的作用正在被化学家一一探明,新的合成药物一批又一批被研制成功,人类的寿命不断地延长。可以说,现代化学正在成为一门满足社会需要的重要学科之一。与此同时,化学向其他学科的渗透趋势在21世纪将会更加明显,更多的化学工作者会投身到研究生命科学、材料等的队伍中去,并在化学与生物学、化学与材料学等的交叉领域中大有作为。化学必将为解决基因组工程、蛋白质组工

程中的问题作出巨大的贡献。

化学的发展已经成为带动和促进其他与之相关学科的发展的基础之一,同时其他学科的发展和技术的进步,会反过来推动化学本身的不断前进。从微观看,化学家已经能够研究单分子中的电子传递过程和能量转移过程;从宏观看,化学家能探讨分子间的作用力和电子的运动。化学家不仅能够描述慢过程,亦能跟踪超快过程,而这些研究将有助于化学家在更深层次揭示物质的性质及物质的变化规律。

随着 20 世纪的去,化学知识和化学生产的普及和发展,以及数学、物理学的进展,一些在此基础上综合发展起来的大科学,开始显现出它们重要的地位。而这些大科学的发展,又会对化学提出新的挑战。化学家要走出纯化学,进入生命科学、材料科学、环境、能源乃至信息科学等,这些都要求化学有新的发展,才能解决现今面临的诸如复杂体系、极端条件和非平衡态等新问题。

总之,化学是一门实用的中心科学,它与数学、物理学等学科共同成为当代自然科学迅猛发展的基础。化学的核心知识已经应用于自然科学的方方面面,与其他学科相辅相成,构成了认识自然和改造自然的强大力量。

二、无机及分析化学课程的性质、任务与学习方法

无机及分析化学课程是相关专业的基础课,主要介绍化学学科的基础理论与基本知识,以及基本实验技能。在此基础上,运用微观理论知识,去揭示物质的组成、结构及其性质与变化规律的关系;用宏观理论知识中的化学热力学与化学动力学知识,计算化学反应中的能量变化,从而判断化学反应的方向、限度、快慢及反应历程,以及掌握化学反应与外界条件的关系等,并将这些知识在水溶液的四大化学平衡中应用和深化。例如,金属离子是酶的辅基或激活剂,金属离子通过自身化合价的变化来传递电子,完成生物体内的氧化还原反应,在维持生物体内的水和电解质平衡等方面亦需要金属离子。总之从生物和化学两方面都逐步认识到所有生物功能均直接或间接地依靠多种金属离子。

学习无机及分析化学课程须用科学的思维方法。科学的方法即在仔细观察实验现象、搜集事实、获得感性知识的基础上,经过分析、比较、判断,然后由表及里、由此及彼地进行推理、归纳得到在概念、定律、原理和学说等不同层次上的理性知识,再将这些理性知识应用到实际生产上,在实践的基础上又进一步丰富理性知识的过程。因此学习无机及分析化学课程与学习其他自然科学一样,必须是从实践到理论再到实践的过程,整个过程中人脑所起的作用就是科学思维。

在学习过程中,应该注意以下两方面:

(1) 学习中要注意基本概念和基本理论知识的理解和应用。学习某一内容时,首先注意研究的对象(物质的名称、组成结构、性质及变化规律等)和背景(化学反应的条件或物质所处的环境等)。重点和难点是什么?然后再研究具体内容,弄清问题的提出,用什么理论、方法、概念或计算公式研究、分析和解决。从而抓住学习要领。例如,学习化学键与分子结构这一章时,首先了解分子是物质的主要存在形式,是原子间靠化学键的作用结合成分子,分子是参与化学反应的基本单元,分子间依靠存在的分子间力、氢键等作用力而结合成物质。继而进一步认识物质的组成、结构和性质的关系,培养自学能力

尽力做到课前预习,以利于主动学习,课后复习和做作业,从中有选择地阅读一些参考书和杂志。

(2)本学科的新知识增长较快,目前教学学时数有限,为此,配合以不断改革教学方法,充分运用现代化教学手段,以期提高学生的可接受性。

三、无机及分析化学的任务

1. 无机化学的任务

无机化学涉及范围很广,它所涉及的一些基础理论是化学研究中的一些普遍规律,是学习有机化学、物理化学、生物化学及结构化学的基础。它的主要研究对象是元素和非碳氢结构的化合物;涉及的内容为原子结构,无机分子结构和晶体结构。化学平衡的理论,元素性质及其周期律,各种无机化合物的性质、制备及应用。

2. 分析化学的任务

分析化学是一个确定物质组成、结构和各组分含量的学科,是化学学科的一个重要分支,它是获取物质化学组成和结构信息并研究相关的分析方法和理论的一门学科。分析化学的研究对象是物质的化学组成和结构,它的任务包括:进行定性分析以确定物质由哪些元素、离子、官能团或化合物组成;进行结构分析以确定物质的存在形态(氧化—还原态、配位态等)和结构(化学结构、晶体结构等);进行定量分析以测量有关组分的含量。通过分析化学可获得物质及其变化的全面信息。

分析化学不仅适用于无机物,也适用于有机物和生物物质。几乎所有的化工生产都离不开它。在冶金、建材、航天、轻工、石油、食品、生物、医药、卫生、材料、环保等行业也得到了广泛应用。

分析化学按其任务可分为定性分析、结构分析和定量分析。在定性分析中,一般是应用化学反应将待测组分转变为具有某些特殊性质的外观表现效果(如沉淀的生成和溶解,颜色的形成或改变,气体的生成等),以判断样品中是否含有某种组分,即解决试样中“有什么”的问题。

分析化学中除了各种化学分析的手段外,仪器分析手段的使用也越来越重要。特别是对于痕量物质的测定和分析。古人云“工欲善其事,必先利其器”。化学实验工作往往离不开测量,因此实验手段的进步,特别是实验仪器的开发使用对化学研究有着重要的作用。19世纪精密天平的出现曾为化学研究开创了一个新的局面。19世纪初期,曾有人提出“任何原子质量都是氢原子质量的倍数”。此学说是否可信有赖于对各种元素的称量测定。后来由于测到了氯元素的原子量并非氢原子整倍数,该学说就受到怀疑并被摒弃。同样的称量工作使化学家 Regleigh 发现,从空气中得到的 N_2 和从氨分解中得到的 N_2 两者的密度不一样。由此而想到空气来源的 N_2 中是否还会有没分开的物质,结果就发现了惰性元素氩(Ar)。

近代化学实验手段的飞跃发展,更是将化学研究推进到一个新的时代。各种波谱,特别是红外、紫外、电磁、核磁技术的发展,使化学物质的结构研究有了明亮的“眼睛”。各种电子能谱的发展又使化学研究如虎添翼,更深入到微观和分子水平的研究。