

21

世纪高等院校教材

# 无机与分析化学

(第二版)

陈虹锦 主 编  
谢少艾 张 卫 副主编

 科学出版社  
www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材

# 无机与分析化学

(第二版)

陈虹锦 主编

谢少艾 张 卫 副主编

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书依据化学原理,将理论(基本化学原理、物质结构、四大化学平衡)、方法及应用(定量分析概论、四大滴定分析)穿插进行编排。同时,兼顾不同课程学时之特点和要求,将有关元素性质的内容根据递变规律编为阅读材料供选修。原无机化学的内容在本书的前6章,第7章是无机与分析部分的连接内容,后续的四大大平衡及滴定体系则在基本原理的基础上突出分析方法之特点和应用,突出“量”的概念。本书具有一定的深度和广度,读者可以根据实际情况和学时要求来使用。

本书适合高等院校化学、化工、生命科学、药学、农学、环境等专业学生使用,也可作为高年级学生考研参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

无机与分析化学/陈虹锦主编. —2版. —北京:科学出版社,2008  
(21世纪高等院校教材)  
ISBN 978-7-03-021961-9

I. 无… II. 陈… III. ①无机化学-高等学校-教材②分析化学-高等学校-教材 IV. O6

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第068021号

责任编辑:赵晓霞 廖忠博 杨向萍/ 责任校对:陈丽珠  
责任印制:张克忠/ 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2002年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2008年7月第二版 印张:35 插页:1

2008年7月第八次印刷 字数:670 000

印数:22001—26 000

定价 49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 第二版前言

2002年8月,在原有参考教材和自编讲义的基础上,根据学校的具体情况和无机与分析化学课程的性质以及面向对象,我们经过积极的工作和努力,在科学出版社出版了《无机与分析化学》。该书对相对独立的无机化学和分析化学的教材体系进行了有机地整合,将原属于两门课程的内容整合为基本化学原理、物质结构、四大化学平衡及滴定分析、元素化学和仪器分析几个模块,并做了较为合理的编排。

2002年本书第一版出版后,得到了使用院校师生的认可,目前已经印刷了7次,印数达2万余册。随着课程体系的改革、精品课程建设和相关的网络资源的建设,我们汇集了教学实践过程中的各种经验和体会,认为在无机与分析化学这门课程的教学和课程建设中,教材的建设还需继续加强。同时,高等教育的模式和理念也随着科技的发展和教育的国际化在逐渐演变,需要教学工作者认真地思考,即如何在教学的过程中培养学生研究性学习的能力,培养学生不断获取知识的能力。为此,在建设精品课程的同时,经过征求教师和学生的意见,我们对第一版教材的成功和不足之处进行了充分、认真的研讨,在科学出版社的大力支持下,决定对教材进行修订,以利于今后更好地进行教学与教学研究和改革。

本书更加注重和强调基本概念的理解和掌握,注重基本原理的应用。并且,结合当今学生接受能力强但不太注重应用的特点,突出了原理在一些方面的应用并增加示例以加强理解,对一些知识点或者相对技巧性的叙述则予以删简以增强教材的适用性。

另外,针对本书内容的重点,我们对课后的思考题和习题也做了较大幅度地修改,增加了一定的题目,提高了练习量,利于学生巩固所学知识。同时,在精品课程网站(相关网址是 [www.inorganic.sjtu.edu.cn](http://www.inorganic.sjtu.edu.cn))的建设过程中,结合书后的思考题和习题,对思考题的理解和疑难题目的解题思路在网站中对学生给予指导。

在编写过程中,马荔、韩莉、舒谋海、李梅等老师给予了极大的支持与帮助,许多使用过第一版教材的同学通过学习,也提出了很多有益的意见和建议,在此一并表示衷心的感谢!

限于时间和水平,书中不妥和错误之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2008年5月于上海

## 第一版前言

无机与分析化学是基础化学的重要课程之一,对于化学化工及化学近源专业如生命科学、环境科学、农学、医学、药学等专业的学生的相关基础和专业知识的学习都是必不可少的。该课程综合了以往的无机化学、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、四大化学平衡、元素化学、滴定分析、仪器分析等。

目前基础教育的宗旨是培养学生的综合素质,提高教学效率及学生自学能力,我们在原来编写的讲义的基础上,经过多次教学实践,将以前课时较长、内容相对重复的课程模块体系进行了较大的调整,以适应不同的专业和不同课时的需要。目前,本教材的基本框架为化学原理、物质结构、四大化学平衡及相应的四大滴定分析体系、定量分析概论和现代分析中的分离方法及仪器分析简介、元素性质及定性分析等几个部分。前面的内容侧重于基础知识和基本概念的学习和掌握,后面的分析化学和元素性质内容则侧重于性质、方法的了解和基本原理、方法的应用。希望学生通过学习本课程达到掌握基础理论知识,了解各种分析方法和熟悉元素性质的目的。由于课时有限,元素的性质部分编写为阅读材料供同学参考阅读或在老师的指导下自学。

本教材主编为陈虹锦,副主编为谢少艾和张卫。绪论由吴旦编写;第二章、第三章、第四章主要由张卫及阎存仙编写;第五章、第六章、第七章、第八章和第十三章主要由陈虹锦、方能虎编写;第九章、第十章、第十一章、第十二章主要由谢少艾、吴旦编写。在整个编写过程中,吴旦老师做了大量的前期准备工作,并对教材的整体编排和构思提出了许多宝贵的意见;阎存仙老师、方能虎老师也参与了较多的工作,在此表示最诚挚的谢意!另外,在教材的编写和教学实践过程中还得到了上海交通大学化学化工学院许多教师和同学的帮助,在此也向他们表示衷心的感谢!在本教材的编写过程中,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,在此说明并致谢。

限于编者对教学改革的认识和理解,以及业务水平和教学经验的局限,书中难免有不妥和错误之处,欢迎读者批评指正。

编者

2002年3月于上海

# 目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 化学发展简史	1
1.2 化学学科的分支	5
1.3 研究化学的方法	7
第 2 章 化学热力学初步	10
2.1 热力学第一定律	11
2.2 热化学	17
2.3 化学反应热效应的计算	22
2.4 状态函数——熵	28
2.5 状态函数——吉布斯自由能	30
思考题	35
习题	35
第 3 章 化学平衡	38
3.1 化学反应的可逆性和化学平衡	38
3.2 平衡常数	39
3.3 标准平衡常数 $K^\ominus$ 与 $\Delta_r G_m^\ominus$ 关系及化学反应的方向	43
3.4 化学平衡的移动	46
思考题	50
习题	51
第 4 章 化学反应速率	54
4.1 化学反应速率的定义及其表示方法	54
4.2 化学反应历程概述	57
4.3 碰撞理论简介	57
4.4 过渡状态理论简介	60
4.5 影响化学反应速率的因素——浓度	62
4.6 影响化学反应速率的因素——温度	67

4.7 影响化学反应速率的因素——催化剂	70
思考题	74
习题	74
<b>第5章 原子结构</b>	<b>77</b>
5.1 核外电子的运动状态	77
5.2 核外电子的排布和元素周期系	97
5.3 元素基本性质的周期性	112
思考题	118
习题	118
<b>第6章 化学键与分子结构</b>	<b>121</b>
6.1 离子键理论	122
6.2 共价键理论	131
6.3 金属键理论	160
6.4 分子间作用力	164
6.5 晶体的基本类型	174
思考题	185
习题	185
<b>【阅读材料1】 硼、碳、氮族元素</b>	<b>187</b>
§ Y-1-1 硼族元素	187
§ Y-1-2 碳族元素	193
§ Y-1-3 氮族元素	201
<b>第7章 定量分析概论</b>	<b>211</b>
7.1 定量分析概述	211
7.2 实验误差与有效数字	217
7.3 实验数据的统计处理	225
7.4 滴定分析法	227
7.5 定量分析中的分离方法	230
思考题	242
习题	243
<b>第8章 酸碱平衡与酸碱滴定法</b>	<b>245</b>
8.1 酸碱平衡的理论基础	245
8.2 溶液中酸碱组分的分布	252
8.3 酸碱溶液 pH 的计算	254

8.4 缓冲溶液 .....	262
8.5 酸碱滴定终点的指示方法 .....	267
8.6 一元酸、碱的滴定 .....	271
8.7 多元酸、混合酸和多元碱的滴定 .....	277
8.8 滴定误差 .....	280
8.9 酸碱滴定法应用 .....	283
8.10 非水溶液中的酸碱滴定 .....	291
思考题 .....	295
习题 .....	295
<b>【阅读材料 2】 碱金属和碱土金属 .....</b>	<b>298</b>
§ Y-2-1 碱金属和碱土金属元素的通性 .....	298
§ Y-2-2 碱金属和碱土金属的重要化合物 .....	299
§ Y-2-3 锂和铍的特殊性 .....	304
<b>第 9 章 沉淀平衡和沉淀滴定法 .....</b>	<b>305</b>
9.1 溶度积和溶解度 .....	305
9.2 沉淀-溶解平衡的移动 .....	308
9.3 影响沉淀溶解度的因素 .....	314
9.4 影响沉淀纯度的因素 .....	317
9.5 沉淀的形成条件 .....	318
9.6 沉淀分析法 .....	320
思考题 .....	327
习题 .....	328
<b>第 10 章 氧化还原平衡和氧化还原滴定法 .....</b>	<b>330</b>
10.1 基本概念 .....	330
10.2 氧化还原反应方程式的配平 .....	333
10.3 电极电势 .....	335
10.4 电极电势的应用 .....	347
10.5 电势图解及其应用 .....	350
10.6 氧化还原滴定法 .....	358
10.7 氧化还原滴定的应用 .....	369
思考题 .....	376
习题 .....	376
<b>【阅读材料 3】 氧族与卤族元素 .....</b>	<b>379</b>



§ Y-3-1 氧族元素 .....	379
§ Y-3-2 卤族元素 .....	390
<b>第 11 章 配位平衡与配位滴定法 .....</b>	<b>399</b>
11.1 配位化合物的基本概念 .....	399
11.2 配合物的化学键理论 .....	408
11.3 配位化合物的稳定性 .....	423
11.4 配位滴定法概述 .....	431
11.5 配位滴定的滴定曲线 .....	440
11.6 金属指示剂 .....	443
11.7 混合离子的分别测定 .....	446
11.8 配位滴定的方式和应用 .....	450
思考题 .....	451
习题 .....	452
<b>【阅读材料 4】 过渡元素 .....</b>	<b>455</b>
§ Y-4-1 过渡元素的通性 .....	455
§ Y-4-2 钛 .....	460
§ Y-4-3 钒 .....	462
§ Y-4-4 铬、钼、钨 .....	462
§ Y-4-5 锰 .....	465
§ Y-4-6 铁系元素 .....	469
§ Y-4-7 铂系元素 .....	474
§ Y-4-8 铜、银、金 .....	476
§ Y-4-9 锌、镉、汞 .....	480
<b>第 12 章 仪器分析简述 .....</b>	<b>483</b>
12.1 吸光光度法 .....	483
12.2 电势分析法 .....	495
12.3 原子吸收分光光度法 .....	507
12.4 气相色谱法 .....	512
思考题 .....	521
习题 .....	522
<b>【阅读材料 5】 镧系、锆系元素 .....</b>	<b>523</b>
§ Y-5-1 通性 .....	523
§ Y-5-2 稀土元素(镧系)的分离 .....	525

---

参考文献	527
附录	529
一、常用重要的物理常数	529
二、常用的单位换算关系	529
三、常见物质的 $\Delta_f H_m^\ominus$ 、 $\Delta_f G_m^\ominus$ 和 $S_m^\ominus(298.15\text{K})$	530
四、弱酸和弱碱在水中的离解常数	535
五、常见难溶电解质的溶度积 $K_{sp}^\ominus(291.15\text{K})$	537
六、标准电极电势(298.15K)	538
七、条件电极电势(298.15K)	541
八、配合物的稳定常数	542
九、金属离子与氨羧配位剂形成的配合物的稳定常数( $\lg K_{MY}$ )	544
十、EDTA 的 $\lg \alpha_{Y(H)}$ 值	545
十一、常见金属离子的 $\lg \alpha_{M(OH)}$ 值	546
十二、常见配离子的稳定常数 $K_{稳}$	546
十三、常见阳离子系统分析	547

# 第 1 章 绪 论

化学是一门了解物质的性质和物质发生反应的科学。它涉及存在于自然界的物质——地球上的矿物、空气中的气体、海洋里的水和盐、在动物身上找到的化学物质以及由人类创造的新物质,还涉及自然界的变化——因闪电而着火的树木、与生命有关的化学变化,以及由化学家发明和创造的新变化。

众所周知,世界是由物质组成的,物质是客观存在的东西,它是未来工程师的实际工作对象,也是化学研究的对象。化学以其特有的观点来研究和认识物质。物质可分为若干层次,目前大家公认的为三个层次:微观、宏观和宇观,其中每个层次又可分为若干亚层次。1989年,我国科学家钱学森建议再加两个物质层次,即渺观和胀观。五个物质层次的情况如表 1-1 所示。

表 1-1 有关物质层次的一些情况

层 次	典型尺度/m	过渡尺度/m	实 例	理 论
胀观	$10^{40}$	$3 \times 10^{30}$	?	?
宇观	$10^{21}$	$3 \times 10^{11}$	银河星系、太阳系	广义相对论
宏观	$10^2$	$3 \times 10^{-8}$	篮球场	牛顿力学
微观	$10^{-17}$	$3 \times 10^{-27}$	基本粒子	量子力学
渺观	$10^{-36}$	?	?	超弦(?)

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扩展、深化。物质在不断运动之中,运动就是变化,物质的运动一般用能量来度量。各层次的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,因此理论的发展也不会终结。微观物质的运动规律不能用牛顿(Newton)力学来解释,量子力学成功地解释了微观物质的运动规律,然而当过渡到渺观层次时,适用于它的是正在发展的“超弦”理论。人类首先认识的是宏观物质,牛顿力学是人类认识物质运动早期的基础;对宇观和微观层次的物质的认识是人类认识物质的扩大和深化,广义相对论和量子力学是研究这两个层次而出现的理论,是牛顿力学的发展和深化。化学研究的内容涉及宏观和微观两个层次交界处的一些亚层次物质。它是一门在原子、分子或离子层次上研究物质的组成、结构、性质等变化及其内在联系和外界变化条件的科学。

## 1.1 化学发展简史

出于对自然界物质的好奇心,人们很早就从自然界分离纯粹化学物质方面

获得了一些成功。人们发现,可以从花卉和某些昆虫中提取颜料,并用于作画和染布。直到 20 世纪,化学家才弄清楚这些天然颜料的详细化学结构。人类很早就学会通过化学变化来制造新的物质,其中最早的可能是肥皂和活性炭。

木材被加热时,将失去水分,生成活性炭。在这个过程中,木材中的纤维素——一种含有碳、氢和氧并全由化学键连接在一起的化合物发生了化学反应,使氢和氧化学键断裂生成水而失去,剩下的碳成为活性炭,这是发生的主要化学变化。但是,仅靠把活性炭和水混在一起,不能使这个过程反过来生成纤维素。因为氧原子和氢原子不能自发地与碳生成所需的化学键,活性炭燃烧时的火焰温度比木材要高。考古文献表明,活性炭在史前时期已经得到应用,肥皂的出现可能还要早些。肥皂不是一种天然产物,但它可以通过加热脂肪和碱使连接脂肪酸和甘油的某些键断裂的办法来制造,肥皂就是脂肪酸和碱生成的盐。因为木材燃烧时能够生成某些碱,这在木材燃烧后的灰烬中可以找到,所以人们相信,古代人类是从脂肪滴到烹调时的燃烧的木材上以后,才开始注意到产生的这种不寻常的物质。

早期的这些“化学家们”的发现多属于偶然,而且在相当长的时间里,偶然性是发现的主要途径。偶然性对于发现至今仍然是重要的,但是随着人们化学知识的增长,现在我们经常通过设计来创造新的化学物质。

### 1.1.1 古代化学

#### 1. 实用和自然哲学时期(史前~公元前后)

在用石器进行狩猎的原始社会中,人类第一个化学上的发现就是火,火大概发现于公元前 50 万年。

约在公元前 3000 年,人类进入奴隶社会时期。这段时期是化学发展史上以实用化学工艺为特征的所谓“实用时期”,这个时期一直延续到公元前后。在这段时期,埃及人学会了利用铁矿石炼铁,制造有色玻璃、鞣制皮革,从植物中提取药物、染料和香料,制造陶器等。在印度和我国,化学工艺的发展比埃及还要早一些。我国铜的冶炼技术发展很早,约开始于公元前 2500~公元前 2000 年。从安阳殷墟发掘出的殷代青铜器来看,铸件异常精美,技术很高,是用孔雀石和木炭来冶炼的,所含铜、锡、铅之比为(79~96):(20~2):(0~2.5)。我国两汉时(公元前 1 世纪)发明了造纸术。

人类在这个时期中积累了不少零星的化学知识,虽还不能构成一门科学,但已构成了思考宇宙结构和物质问题的基础,并提出过一些看法。关于宇宙的结构问题,最早的见解出现于我国商末(约公元前 1140 年)《易经》中的“八卦”和“五行”学说中,这些朴素的学说后来被人们所神化而失去了积极的作用。古希腊比中国晚 300 余年才出现各种有关宇宙构造的思想,直到公元前 5 世纪,安培多克尔

(Empedocles)指出宇宙是由水、火、气、土四种原质所构成的。公元前4世纪,亚里士多德(Aristotle)在《发生和消灭》一书中说:“将四种‘原性’——热、冷、干、湿成对地组合起来便可得出安培多克尔的四‘原质’,物质的多样性全靠这些‘原性’的不同比例的结合”。根据亚里士多德的看法,如果把“原性”取出或放入,“原质”就可相互转化,因此创造各种物质的技术就在于把几种固定的性质结合起来。这种错误的哲学思想整整统治了人类长达2000年之久,使化学走上了炼金、炼丹的歧途。

## 2. 炼金术、炼丹时期(公元前~公元1500年)

这段化学发展时期相应于封建社会发展时期,这个时期最早出现于中国。由于中国封建主的贪得无厌,梦想长生,促使许多道家用化学方法去炼“丹”(今日的 $Pb_3O_4$ 和 $HgS$ )。公元2世纪,东汉魏伯阳著有《周易·参同契》一书,这部书是世界上现存最古老的炼丹术文献。公元4世纪,东晋葛洪著有《抱朴子·内篇》20卷,是一部炼丹术巨著,他发现了反应的可逆性( $HgS$ 和 $Hg$ ,  $Pb_3O_4$ 和 $Pb$ 间互变)以及金属间的取代(铁和铜盐)。

阿拉伯的炼丹术比中国晚500年左右才开始,它们具有相同的哲学思想,都是以“性质”为主,好似“性质”主宰“物质”,而不是“物质”具有“性质”。欧洲也这样,梦想制备出一种性质完美的“哲人石”,然后用它与别的物质一接触,此物质即可变成黄金。当时的人们认为黄金越多越好,因为黄金是当时支付的唯一手段。

在这段时期中,人们走入了歧途,但也积累了更多的化学知识,提高了实验技术,制作了许多操作器皿。

## 3. 医化学时期(公元1500~1700年)

16世纪初期,欧洲的生产力发展较快,突破了封建制度,开始了资本主义工业的发展,商业的兴盛和生活本身所提出的一系列新要求如医治疾病等,使化学进入医化学时期;另一方面,炼金、炼丹家做了千年以上的努力也是徒劳甚至危害生命的,因而他们逐渐放弃了这项试验。

以炼金术改革者而出现的有巴拉塞尔斯(Paracelsus)和阿格利柯拉(Agricola)。巴拉塞尔斯写道:“化学的目的并不是为了制造金子和银子,而是为了制造药剂”。当时用化学方法制成了许多药剂(主要是无机化合物),成功地医治了一系列疾病,促使许多医生加入这一队伍,推动了化学的发展。阿格利柯拉则总结了那时的采矿和冶金技术,著成一本巨著《论金属》。

我国明代医药化学家李时珍著有药物学巨著《本草纲目》(1590年),书中列有中药材、矿物等1000多种并附有制备方法、性质介绍。明代的宋应星也像阿格利柯拉一样,总结了我国古代的工业技术,著有《天工开物》(1639年)一书。

#### 4. 燃素学说时期(公元 1700~1774 年)

由于在当时和化学联系最密切的除药物外就是冶金,因此人们的注意力指向了燃烧反应。公元 1700 年左右,史塔尔(Stahl)提出了一种燃素学说,他认为任何能燃烧的物体里都含有一种名叫燃素的物质。当物质燃烧时,该物质就失去燃素,若在矿石中加入含有燃素的物质(如煤),就可以得到金属。这在某种程度上统一说明了当时所积累的几乎全部实验材料。此学说的主要功绩是彻底清除了亚里士多德的“原性”学说,但是它本身却存在着致命的缺陷:所有被氧化的金属总是比未氧化前要重些,这和预期的结果相反。燃素说企图用燃素具有“负重量”来说明这一事实,这显然不能使人信服。最后不得不宣告失败而被拉瓦锡(Lavoisier)新的氧化理论所替代。实验证实燃烧并不是放出燃素,恰恰相反,是燃烧物质和空气中的氧所起的化合反应,由此开始了近代化学的萌芽。

##### 1.1.2 近代化学的萌芽

从 1661 年波义耳(Boyle)发表他的名著《怀疑派的化学家》起,一直到 1869 年门捷列夫(Менделеев)建立元素周期系为止约 200 年的时间,可以作为近代化学由萌芽发展到比较成熟的时期。

近代化学时期的到来首先要归功于天平的使用,它使化学的研究进入定量阶段。这样才出现了一系列的基本定律和原子、分子学说,如 1748 年罗蒙诺索夫(Ломоносов)的能量不灭定律;1774 年拉瓦锡的氧化理论;18 世纪末叶,普劳斯特(Proust)的定比定律;1803 年开始由道尔顿(Dalton)建立的倍比定律、当量定律、原子学说、相对原子质量概念;1808 年盖·吕萨克(Gay Lussac)的气体简比定律;1811 年阿伏伽德罗(Avogadro)的定律和分子概念。这些基本定律和原子分子学说的产生,使化学成为了一门科学。

1869 年,门捷列夫把当时已知的 60 多种元素按相对原子质量和化学性质之间的递变规律排列起来,组成了一个元素周期系,并找出了它们的规律——元素周期律,使化学科学提高到了辩证唯物主义的高度,充分体现了从量变到质变的客观规律。

##### 1.1.3 化学的现状

由于物理学在 19 世纪末到 20 世纪初获得了一系列的新发现(如电子、原子核、放射性等)以及量子力学的出现,使物质结构理论大大地向前发展了一步,使化学在加深微观认识的基础上弄清了许多化合物的性质与结构的关系,给无机化合物和有机化合物的合成提供了指导作用,特别是合成出的有机化合物数量急剧上升。20 世纪以来,随着实验技术的更新,化学知识越来越丰富,反应的能量问题、

方向问题、机理问题都得到了广泛而深入的研究,从而进一步促进了化学理论的发展。

在1995年一年中,化学家创造了100万种以上的新化合物。在日益加快步伐地合成出来的新化合物中,有些新分子正在被考察作为新药物的可能,另外一些则被用于制造新材料,如有用的塑料等。新近发明的化学反应常用于提高生产药用化合物和其他化学物质的效率。生物化学和分子生物学处于药学和生物学的边缘。现在科学家正在从事揭示生命与疾病的化学工作。利用这些信息,药物化学家可以设计新的药物。

另外一些化学家在做环境方面的工作,研究正在发生些什么(如使臭氧产生空洞的化学反应)和探索如何使制造过程有利于环境。开发这类过程是化学和制药工业的主要方向,他们立志要使现代工业充分地考虑环境,而成为“绿色化学”的一部分。

另一方面,化学提供的特殊材料使得现代电子学成为可能,同时它也积极地使用着计算机。计算化学领域应用现代化学理论对以下方面进行预测:①未知化学物质的性质;②未知化学物质应有的几何形状;③在还没有研究清楚的分子之间将发生的反应;④未知反应的速率;⑤能够有效地制造复杂新分子的合成路线。

今天的化学家已经能够利用激光技术在极短的时间内查出反应过程中的过渡态。15年前,我们只能追踪到存在寿命大于百万分之一秒的中间瞬态,现在可以靠激光闪光光解最尖端的技术把时间缩短到ps( $10^{-12}$ s),最近已达到0.01ps,这大大推动了动力学的发展。实验室中已经合成出一些行之有效的植物激素、生长调节剂和昆虫的信息素,它们都能直接或间接地增加粮食生产。例如,从药材楝树中提取出来的茛菪碱子素,只要 $2 \times 10^{-9} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的量就足以阻止沙漠蝗进食。再如,合成出的瓦尔堡喷洒在玉米叶上停留30min后,叶上的昆虫将会永远失去进食能力。人的生老病死等生命过程都是化学变化的表现,人们已在分子水平上认识了药物的化学作用。这些知识有助于我们在分子水平上治疗疾病,从而达到理想疗效。

从上面几个方面可以看到最近20年间现代化学发展的深度和广度,因此把化学和物理学说成是当今自然科学的轴心,应该是当之无愧的。

## 1.2 化学学科的分支

化学的研究范围极其广泛。按其研究对象和研究目的不同,化学已逐渐形成了分析化学、无机化学、有机化学和物理化学等分支学科。

分析化学的分支形成最早。19世纪初,相对原子质量的准确测定促进了分析化学的发展,这对相对原子质量数据的积累和周期律的发现有很重要的作用。

1841年 J. J. Berzelius 的《化学教程》，1846年 C. R. Fresenius 的《定量分析教程》和 1855年 E. Mohr 的《化学分析滴定法教程》等专著相继出版，其中介绍的仪器设备、分离和测定方法，已初具今日化学分析的端倪。随着电子技术的发展，借助于光学性质和电学性质的光度分析法以及测定物质内部结构的 X 射线衍射法、红外光谱法、紫外光谱法、核磁共振法等则是近代的仪器分析方法，这些方法可以快速、灵敏地进行检测。例如，对运动员的兴奋剂检测，尿样中某些药物浓度即使低到  $10^{-13} \text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$  时，也难逃分析化学的检测。

无机化学的形成常以 1870 年前后门捷列夫和迈耶 (Meyer) 发现元素周期律和公布元素周期表为标志。他们把当时已知的 63 种元素及其化合物的零散知识，归纳成一个统一整体。一个多世纪以来，化学研究的成果还在不断丰富和发展元素周期律，元素周期律的发现是科学史上的一个勋业。

有机化学的结构理论和有机化合物的分类，也形成于 19 世纪下半叶。例如，1861 年凯库勒 (Kekulé) 提出碳的四价概念及 1874 年范特霍夫 (van't Hoff) 和勒贝尔 (Lebel) 的四面体学说，至今仍是有机化学最基本的概念之一，世界有机化学权威杂志就是用“Tetrahedron”(四面体)命名的。有机化学是最大的化学分支学科，它以碳氢化合物及其衍生物为研究对象，也可以说有机化学就是“碳的化学”。医药、农药、染料、化妆品等都与有机化学有关。在有机化合物中，有些小分子如乙烯 ( $\text{C}_2\text{H}_4$ )、丙烯 ( $\text{C}_3\text{H}_6$ )、丁二烯 ( $\text{C}_4\text{H}_6$ ) 在一定温度、压力和有机催化剂的条件下可以聚合成为相对分子质量为几万、几十万的高分子材料，这就是塑料、人造纤维、人造橡胶等，它们已经走进千家万户、各行各业。目前高分子材料的年产量已超过 1 亿吨，预计在不久的将来，其总产量会大大超过各种金属总产量之和。若按使用材料的主要种类来划分时代，人类经历了石器时代、青铜器时代、铁器时代，目前正在迈向高分子时代。现在已把高分子化学列为另一个化学分支学科。

物理化学是从化学变化与物理变化的联系入手，研究化学反应的方向和限度 (化学热力学)、化学反应的速率和机理 (化学动力学) 以及物质的微观结构和宏观性质间的关系 (结构化学) 等问题，它是化学学科的理论核心。1887 年，奥斯特·瓦尔德 (W. Ostwald) 和范特霍夫合作创办了《物理化学杂志》，标志着这个分支学科的形成。随着电子技术、计算机、微波技术等的发展，化学研究如虎添翼，空间分辨率现已达  $10^{-10} \text{m}$ ，这是原子半径的数量级，时间分辨率已达飞秒级 ( $1\text{fs} = 10^{-15} \text{s}$ )，这和原子世界里电子运动速度差不多。肉眼看不见的原子，借助于仪器的延伸已经变得可以实际观测，微观世界的原子和分子不再那么神秘莫测了。

在研究各类物质的性质和变化规律的过程中，化学逐渐发展成为若干分支学科，但在探索和处理具体课题时，这些分支学科又相互联系、相互渗透。无机化合物或有机化合物的合成总是研究 (或生产) 的起点，在进行过程中必定要靠分析化学的测定结果来指示合成工作中原料、中间体、产物的组成和结构，并且这一切也



都离不开物理化学的理论指导。化学学科在其发展过程中还与其他学科交叉结合形成多种边缘学科,如生物化学、环境化学、农业化学、医用化学、材料化学、地球化学、放射化学、激光化学、计算化学、星际化学等。

### 1.3 研究化学的方法

我们知道,实践是认识世界的基础,是衡量真理的最高标准。物质世界中千变万化的化学现象都是通过化学实验观察到的,而化学科学中的一些学说和定律,既是在实验的基础上经综合、归纳而得到的,也是在实验的鉴别中修正、发展而成熟的。可见实验在化学发展中具有特殊的重要作用。从这个意义上说,人们把化学科学看成是一门实验性科学。对于从事化学研究工作的人员来说,不论是研究应用化学的,还是研究理论化学的,都应该高度重视化学实验,否则将无法正确认识化学世界。

#### 1.3.1 离开实验就没有发现

化学和其他自然科学相比,更能显示出它对实验的依赖关系,任何化学的原理、定律以及规律无一不是从实验中得出的结论。因此只有那些思维活跃、求知欲望强烈,同时又有良好实验习惯和动手能力,并能注意观察现象的人才有可能成为化学研究的成功者。

居里(Curie)夫人是一位伟大的化学家,也是实验工作的典范。1898年,居里夫人在研究元素铀的放射性时发现,铀矿石的放射性比提纯后的铀化合物的放射性更强。于是预言在未提纯的铀矿石中肯定有一种新的元素比铀的放射性更强。然而当时的化学家中有相当一部分人对此持怀疑态度,他们要求居里夫人提供新元素的相对原子质量。为此在1899年~1902年整整4年时间里,居里夫妇日以继夜地工作,从8t沥青铀矿中提炼出0.1g的新元素氯化物,并以这少量的纯化合物测出了新元素的相对原子质量为225,即新元素——镭。居里夫妇为此获得了诺贝尔化学奖。

许多新的发明也是在大量实验基础上才得以问世的。如合成氨催化剂,历经几百个配方、上万次的试验才成功,这也说明成功的背后是大量辛勤的劳动。

#### 1.3.2 细致观察是成功的基础

实验态度的一丝不苟,实验数据的认真记录和积累虽是实验中的重要环节,而实验过程中疏而不漏的细致观察,特别是对一些反常现象的观察尤为重要,它往往会带来一些意想不到的发现。

1826年,法国青年科学家巴拉尔,从海藻中提取元素碘,每当他向海藻灰提取