



新世纪高等学校教材

大学公共课系列教材

无机及分析化学

WUJI JI FENXI HUAXUE

张永安 主 编

郑向军 杨晓晶 副主编



北京师范大学出版集团

BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP

北京师范大学出版社

新世纪高等学校教材

大学公共课系列教材

无机及分析化学

WUJI JI FENXI HUAXUE

张永安 主 编

郑向军 杨晓晶 副主编



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP) 数据

无机及分析化学/张永安主编. —北京: 北京师范大学出版社, 2009.8

新世纪高等学校教材

ISBN 978-7-303-09990-0

I. 无… II. 张… III. 无机及分析化学—高等学校—教材 IV. O61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 070914 号

营销中心电话 010-58802181 58808006
北师大出版社高等教育分社网 <http://gaojiao.bnup.com.cn>
电子信箱 beishida168@126.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com.cn
北京新街口外大街 19 号
邮政编码: 100875

印 刷: 北京京师印务有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 170 mm × 230 mm
印 张: 28.25
字 数: 479 千字
版 次: 2009 年 8 月第 1 版
印 次: 2009 年 8 月第 1 次印刷
定 价: 45.00 元

策划编辑: 范 林 责任编辑: 范 林
美术编辑: 高 霞 装帧设计: 高 霞
责任校对: 李 茵 责任印制: 李 丽

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

内容简介

本书是为非化学专业学生学习无机化学和分析化学而编写的教材。本书是与《大学基础化学实验》相配套的一本教材,经多届学生使用,逐步完善、修改定稿的。

全书共分 17 章,第 1、2 章是属于化学基本常识的内容,目的是为了与中学化学内容的衔接,同时也为学生自学提供方便。第 3 至第 10 章是属于无机化学理论的基本内容,包括与结构化学有关的内容(原子结构、分子结构、晶体结构);与物理化学有关的内容(热力学、化学动力学、化学平衡);无机化学经典理论的内容(电离、沉淀与溶解、氧化与还原、配位四大平衡理论);第 11 至第 14 章为元素化学的内容;第 15 章简单介绍生命必需元素与人体健康方面的知识;第 16、17 章为分析化学内容。每章均有学习要求,有些章节穿插选读的内容,如能源、化学电源、污水处理等。书后附有部分习题答案和附录。

本书可作为生物、医学、材料、环境科学等专业以及师范专业的化学教材或参考书,还可用作具有中学化学基础以上的科技工作者学习或培训教材。

北京师范大学化学学院简介

北京师范大学化学系成立于 1923 年,其前身为北京高等师范学校于 1913 年设立的物理化学部,至今有近百年的历史。1952 年,我国大规模进行院系调整时,辅仁大学化学系并入北京师范大学化学系。2005 年 9 月,北京师范大学化学系撤系建院,并更名为北京师范大学化学学院。

化学学院具有辉煌的历史,曾培养和造就了一大批杰出的学者,许多著名的化学家和教育家先后在此学习或任教。包括陈裕光教授、吴承洛教授、邢其毅院士、杨葆昌教授、严梅和教授、鲁宝重教授、陈光旭教授、蒋丽金院士、董绍俊院士、刘若庄院士、刘伯里院士和刘知新教授等。经过几代学者和师生员工们的共同努力,尤其是经过改革开放 30 年来的发展,化学学院已成为综合实力雄厚、在我国具有重要影响的化学教育和研究机构,是我国培养高水平化学教育和科研人才的重要基地。

化学学院设有博士后科研流动站,是化学一级学科博士学位授权单位;无机化学、分析化学、有机化学、物理化学和高分子化学与物理等化学学科的全部 5 个二级学科均为博士学位授权点,其中,有机化学和物理化学为国家首批博士学位授权点,无机化学为国家第二批博士学位授权点;药物化学具有硕士学位授予权;此外,化学学科教学论也可以授予博士学位。物理化学是国家重点学科,无机化学和有机化学是北京市重点学科。拥有 1 个放射性药物教育部重点实验室和 1 个量子化学生物学教育部创新团队。化学实验教学中心于 2007 年 12 月被评为国家级实验教学示范中心建设单位。

近 10 年来,化学学院获国家级教育教学成果二等奖 1 项、北京市教育教学成果一等奖 2 项、二等奖 1 项,主持国家级教改项目重点项目 1 项、国家级一般项目 3 项、北京市教改项目 2 项。主持国家级精品课 2 门、北京市精品课 3 门,拥有北京市教学名师奖获得者 1 位。编写本科生教材 30 余部,其中面向 21 世纪教材 4 部、“十五”规划教材 3 部、“十一五”规划教材 6 部和北京市精品教材 4 部;2007 年获北京市精品教材立项项目 6 项。

这一切映射出了百年北京师范大学和近一个世纪的北京师范大学化学学院的历史积淀和厚重的底蕴所应具有的水平 and 办学实力!

前言

本书是为大一学生学习无机和分析化学而编写的教材。《无机及分析化学》在学生的专业学习中起着承前启后的作用，本书既要在中学化学的基础上提高一步，又要为后续专业课的学习提供必要的理论和化学知识，这是本书编写的基本出发点。我们认为本书应该突出公共基础课的特点，根据无机化学和分析化学的任务和要求，以及编写教材必须遵循科学性、先进性和实践性的原则，我们着重考虑了以下几点：

1. 力图编写一本简明教材。作为专业基础课或公共基础课的化学教学，既要反映现代科学的最新进展，又要适应当前拓宽基础，培养复合应用型人才的要求；同时又要适应当前压缩课时，减轻学生学习负担的形势。因此，编写一本适应学生基础的简明教材是非常必要的。

2. 本书力求做到通俗易懂，阐述准确、重点突出。所以在选材时根据无机化学和分析化学的基本要求选择基础内容，对一些过繁数学推导在教学内容中作了简化处理。我们认为更全面、更严格、更深入的讨论应在以后更高层次的学习或实践中去解决。

3. 本书以传统的无机化学基本内容为主线，适当增加一些阅读内容，以突出无机化学的实用性。在介绍元素与化合物的有关内容时，适当增加了在工农业生产和日常生活中应用的内容。对大家所关心的能源、环境、材料、健康等热点问题，从无机化学的角度作一些简要的介绍。涉及分析化学的内容主要是应用广泛、偏重基础的滴定分析和光度分析两部分。滴定分析一章包括酸碱滴定、沉淀滴定、氧化还原滴定和配位滴定等内容。本章内容与无机化学密切相关，因此既可穿插在无机化学的相关章节中讲授，也可单独讲授。考虑到滴定分析内容的自身特点以及在无机化学有关章节中所占篇幅较大，所以单列一章介绍，教师在安排课程时可灵活掌握。

本书共分 17 章，前 15 章属无机化学的内容；后两章属分析化学的内容。第 7、8 章由杨晓晶老师编写；第 9、10 章由郑向军老师编写；第 16 章的部分内容及第 17 章由赵慧春老师编写；其余各章由张永安老师编写。全书由张永安老师统稿。

本书在编写过程中得到了北京师范大学化学学院老师的指导和帮助，得到了北京师范大学出版社的大力支持，在这里谨表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者
2009 年 3 月

目 录

第 1 章 摩尔、理想气体定律和溶液浓度(阅读) /1	
1.1 SI 单位制简介	1
1.2 物质的量的单位——摩尔	3
1.3 理想气体定律	5
1.4 溶液和溶液浓度	8
习 题	15
第 2 章 稀溶液通性和胶体溶液 /17	
2.1 非电解质稀溶液依数性	17
2.2 胶体溶液	24
2.3 水与污水的处理(阅读)	29
习 题	36
第 3 章 化学热力学基础 /37	
3.1 热力学中常用的术语	37
3.2 化学反应中的能量守恒定律	40
3.3 热化学	44
3.4 化学反应的方向	49
3.5 自由能	54
3.6 能源知识简介(阅读)	59
习 题	64

第 4 章 化学反应速率和化学平衡 /67

4.1 化学反应速率及其表示方法	67
4.2 影响反应速率的重要因素	69
4.3 化学反应的活化能	73
4.4 化学平衡状态	75
4.5 影响化学平衡的因素	81
习 题	84

第 5 章 溶液中的酸、碱电离平衡 /87

5.1 强电解质的电离	87
5.2 水的电离与 pH	89
5.3 酸碱理论	92
5.4 弱酸弱碱的电离平衡	95
5.5 酸碱电离平衡的移动	102
5.6 缓冲溶液	104
习 题	110

第 6 章 沉淀溶解平衡 /113

6.1 溶度积常数	113
6.2 溶度积规则及其应用	117
6.3 沉淀的生成和溶解	120
6.4 分级沉淀	126
6.5 沉淀的转化	127
习 题	129

第 7 章 原子结构与元素周期律 /132

7.1 氢原子光谱和玻尔的氢原子模型	132
7.2 原子核外电子的运动状态	136
7.3 多电子原子结构	144
7.4 原子的电子层结构和周期表	153
7.5 元素基本性质的周期性	155
习 题	159

第 8 章 化学键与分子结构 /162

8.1 离子键理论	162
8.2 共价键理论	167
8.3 分子间作用力和氢键	189
8.4 晶体结构	197
习 题	207

第 9 章 氧化还原 /210

9.1 氧化还原反应的基本概念	210
9.2 原电池和电极电势	214
9.3 影响电极电势的因素	221
9.4 元素电势图	223
9.5 化学电源简介(阅读)	225
习 题	227

第 10 章 配位化合物 /230

10.1 配合物的基本概念	230
10.2 配合物的价键理论	236
10.3 配位平衡	239
10.4 配合物的应用	243
10.5 晶体场理论简介	246
习 题	252

第 11 章 s 区元素 /254

11.1 碱金属和碱土金属概述	254
11.2 单质的化学性质	256
11.3 氢氧化物	261
11.4 碱金属和碱土金属盐	262
11.5 Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Ba^{2+} 的鉴定	264
11.6 锂、铍的特殊性和对角线规则	266
11.7 硬水和硬水的软化(阅读)	267
习 题	270

第 12 章 p 区元素 /272

12.1 卤素	273
12.2 氧族元素	283
12.3 氮族元素	291
12.4 碳、硅、硼	300
12.5 p 区重要的金属元素简介	308
习 题	312

第 13 章 ds 区元素 /315

13.1 铜副族和锌副族概述	315
13.2 铜副族和锌副族单质	316
13.3 氧化物和氢氧化物	319
13.4 盐 类	321
13.5 s 区和 ds 区元素性质对比	329
13.6 Cu^{2+} 、 Ag^{+} 、 Zn^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Hg_2^{2+} 的鉴定	330
习 题	331

第 14 章 d 区元素 /333

14.1 d 区元素的通性	334
14.2 d 区元素个论	337
习 题	353

第 15 章 生命必需元素与人体健康 /355

15.1 人体中元素的分类	355
15.2 生命必需元素与人体健康	357
15.3 一些有害元素的毒性	364
15.4 饮食与健康	366
习 题	369

第 16 章 滴定分析法 /370

16.1 滴定分析法常识	370
16.2 酸碱滴定法	375
16.3 沉淀滴定法	383

16.4 氧化还原滴定法	386
16.5 配位滴定法	393
习 题	407

第 17 章 吸光光度法 /409

17.1 物质对光的选择性吸收和光的吸收定律	409
17.2 吸光光度法的仪器	413
17.3 吸光光度法分析条件的选择	414
17.4 吸光光度法的测量误差及测量条件的选择	416
17.5 吸光光度法的应用	417
习 题	419

附 录 /420

附录 1 常用酸、碱的浓度	420
附录 2 常见弱酸、弱碱的电离平衡常数(298.15 K) ...	420
附录 3 一些难溶化合物的溶度积(298.15 K)	422
附录 4 一些半反应的标准电极电势(298.15 K)	424
附录 5 一些配离子的标准稳定常数(298.15 K)	427
附录 6 常见物质的 $\Delta_f H_m^\ominus$ 、 $\Delta_f G_m^\ominus$ 和 $S_m^\ominus$	429
附录 7 元素的性质一览表(原子半径、离子半径、电离 能、电子亲和能、电负性)	434
附录 8 元素周期表	437

部分习题参考答案 /438

第 1 章 摩尔、理想气体定律和 溶液浓度(阅读)

(mole、Ideal Gas Law and Concentration of Solution)

本章学习要求

1. 掌握摩尔的含义和基本单元的概念。
2. 掌握摩尔质量、理想气体摩尔体积和物质的量浓度几个重要概念以及它们在化学中的应用。
3. 掌握理想气体状态方程式和气体分压定律、气体扩散定律。
4. 熟练掌握溶解度的概念。
5. 熟练掌握几种浓度的表示方法，并能熟练地进行有关计算。

1.1 SI 单位制简介

1.1.1 SI 制

SI 制是法定国际单位制(Le Système International d'Unités)的缩写，是 1960 年第 11 届国际计量大会建议推广的单位制。1977 年我国国务院明确规定推行这一单位制为法定单位制。

SI 制是由 SI 单位(包括七个基本单位、两个辅助单位和一系列的导出单位)、SI 词头以及 SI 单位十进倍数或分数单位三部分组成(表 1.1、表 1.2、表 1.3)。

表 1.1 SI 基本单位

物理量	单位名称	单位符号	
		中文	国际符号
长度	米	米	m
质量	千克	千克	kg
时间	秒	秒	s

续表

物理量	单位名称	单位符号	
		中文	国际符号
热力学温度	开尔文	开	K
物质的量	摩尔	摩	mol
电流	安培	安	A
发光强度	坎德拉	坎	Cd

表 1.2 SI 导出单位(部分)

物理量	单位名称	单位符号	
		中文	国际符号
力	牛顿	牛	$\text{N}(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
压力、压强、应力	帕斯卡	帕	$\text{Pa}(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$
能量、热量、功	焦耳	焦	$\text{J}(\text{N} \cdot \text{m})$
电荷量	库仑	库	$\text{C}(\text{A} \cdot \text{s})$
电位、电压、电动势	伏特	伏	$\text{V}(\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1})$
频率	赫兹	赫	$\text{Hz}(\text{s}^{-1})$

表 1.3 SI 词头(部分)

因数	符号		因数	符号	
	中文	国际		中文	国际
10^1	十	da	10^{-1}	分	d
10^2	百	h	10^{-2}	厘	c
10^3	千	k	10^{-3}	毫	m
10^6	兆	M	10^{-6}	微	μ
10^9	吉	G	10^{-9}	纳	n
10^{12}	太	T	10^{-12}	皮	p
10^{15}	拍	P	10^{-15}	飞	f
10^{18}	艾	E	10^{-18}	阿	a

1.1.2 我国法定计量单位和废除单位

我国法定计量单位是国家以法令的形式明文规定在全国采用的计量单位。它是以国际单位制为基础,同时选用国内外习惯或通用的非国际单位制的单位。这些单位列在表 1.4 中。考虑到一些旧书使用的是非推荐单位或是废除单

位, 这些单位与 SI 单位之间的换算列在表 1.5 中, 以便查阅。

表 1.4 我国选定的非国际单位制的单位和废除单位

法定计量单位				废除单位		
量的名称	单位名称	符号	换算关系	量的名称	单位名称	符号
时间	分	min	1 min = 60 s	长度	埃	10^{-10} m
	小时	h	1 h = 60 min	力	达因	1 dyn = 10^{-5} N
	天(日)	d	1 d = 24 h		千克力	1 kgf = 9.80665 N
质量	吨	t	1 t = 10^3 kg	压力、压强	巴	bar
	原子质量单位	u	1 u $\approx 1.66 \times 10^{-27}$ kg		标准大气压	atm
体积	升	L(l)	1 L = 10^{-3} m ³		毫米汞柱	mmHg
能	电子伏特	eV	1 eV $\approx 1.60 \times 10^{-19}$ J	能、热、功	卡路里	cal
					尔格	erg

表 1.5 一些非推荐单位、导出单位与 SI 单位的换算

物理量	换算单位
长度	$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$, $1 \text{ in} = 2.54 \times 10^{-2} \text{ m}$
质量	$1 \text{ b(磅)} = 0.454 \text{ kg}$, $1 \text{ oz(盎司)} = 28.3 \times 10^{-3} \text{ kg}$
压力	$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, $1 \text{ mmHg} = 1 \text{ Torr} = 133.3 \text{ Pa}$
温度	$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15$, $F(^{\circ}\text{F}) = 9/5 T(\text{K}) - 459.67 = 9/5 t(^{\circ}\text{C}) + 32$
能量	$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$, $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$, $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$
电量	$1 \text{ esu(静电单位库仑)} = 3.335 \times 10^{-10} \text{ C}$
其他	$R(\text{气体常数}) = 8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} = 1.986 \text{ cal} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ $= 8.314 \text{ kPa} \cdot \text{L} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ $= 8.314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} = 0.08206 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ $1 \text{ D(Debye)} = 3.336 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$

1.2 物质的量的单位——摩尔

1.2.1 摩尔的概念

“物质的量”是用来表示微观物质的基本单元, 如分子、原子、离子、电子等粒子或其特定组合的一个物理量。物质的量的国际单位制单位名称为摩尔(mole), 单位符号为摩(mol)。国际计量委员会提出的摩尔定义为: 摩尔是一

个系统的物质的量，该系统中所包含的基本单元数与 $0.012 \text{ kg } ^{12}\text{C}$ 原子数目相等。如上所述，物质的量是一个整体，有特定的含义，不能把物质的量当做表示物质的数量或质量的多少的量来理解，同时也不能将物质的量简化或拆分。

使用摩尔时，应该指明基本单元，基本单元可以是分子、原子、离子、电子等粒子或其特定组合。如氯化钠中不存在分子，可把一个 Na^+ 和一个 Cl^- 作为一个特定的组合单元。基本单元并不一定要求是整数，可根据客观需要，将 $\frac{1}{2}\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\frac{1}{5}\text{KMnO}_4$ 、 $(2\text{H}_2 + \text{O}_2)$ 等作为基本单元。 400°C 的三氯化铁的蒸气是双聚分子，它的基本单元可用 $(\text{FeCl}_3)_2$ 表示。

现已知道 $0.012 \text{ kg } ^{12}\text{C}$ 中含有 $6.022\,136\,7 \times 10^{23}$ (近似值 6.02×10^{23}) 个 C 原子，为纪念阿伏伽德罗对分子学说的贡献，把该数值称为阿伏伽德罗常数 (N_A)。使用摩尔时有关基本单元的举例如下：

1 mol Cl_2 ，表示有 N_A 个 Cl_2 分子；

1 mol Cl ，表示有 N_A 个 Cl 原子；

1 mol Cl^- ，表示有 N_A 个 Cl^- 离子。

上面表示的含义非常明确，如果笼统地说“1 mol 氯”，其含义就含糊不清，因为无法断定 1 mol 氯是指氯分子，还是指氯原子、氯离子。

1.2.2 摩尔质量、气体摩尔体积

1. 摩尔质量

某物质 1 mol 的质量叫该物质的摩尔质量。在数值上等于该物质的相对原子质量、相对分子质量或化学式量，其单位是 $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。其数学表达式为

$$M = \frac{m}{n} \quad (1-1)$$

式中， M 为摩尔质量； m 是物质的质量，通常单位为 g ； n 为物质的量。

2. 气体摩尔体积

在标准状况 (0°C 和 100 kPa) 下，1 mol 的任何理想气体所占的体积 (约 22.4 L)，单位为 $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

3. 涉及摩尔的重要化学概念

在溶液浓度的表示中，常用到摩尔的概念，如物质的量浓度、质量摩尔浓度、物质的量分数、物质的量百分数等。有关内容将在 1.4.4 节中介绍。

1.3 理想气体定律

1.3.1 理想气体状态方程

气体的存在状态主要决定于四个因素,即体积、压强、温度和物质的量。反映这四个物理量之间的关系的式子称为气体状态方程。

1662年英国化学家波义耳(Boyle)通过实验证明:在温度不变时,一定量的气体的体积与压强成反比,即气体的压强与体积的乘积为一常数(K)。其数学表达式为

$$pV = K \quad (T, n \text{ 一定}) \quad (1-2)$$

后来法国科学家查理(Charles)和盖·吕萨克(Gay Lussac)用实验证明:在压强不变时,一定量的气体的体积与温度成正比,即气体的体积与温度之比为一常数(K')。其数学表达式为

$$\frac{V}{T} = K' \quad (p, n \text{ 一定}) \quad (1-3)$$

1881年意大利化学家阿伏伽德罗(Avogadro)指出:在相同的温度和压强下,相同体积的任何气体都含有相同数目的分子。当气体的温度和压强不变时,气体的体积与气体的分子数目或气体的物质的量成正比。即

$$V \propto n \quad (p, T \text{ 一定}) \quad (1-4)$$

综上所述,气体的体积(V)与气体物质的量(n)、温度(T)成正比,而与压强(p)成反比。即

$$V \propto \frac{nT}{p}$$

或写成

$$V = R \frac{nT}{p}$$

即

$$pV = nRT \quad (1-5)$$

式(1-5)称为理想气体状态方程式。 R 是摩尔气体常数,简称气体常数。 R 的数值和单位与 p 、 V 有关。

当 p 的单位为Pa(帕斯卡), V 的单位为 m^3 或L,当 n 为1 mol的气体,在273.15 K时占有22.4 L的体积,将这些数值代入上面的气体状态方程便可得到气体常数 R 的数值和相应的单位。

$$R = \frac{pV}{nT} = \frac{1.013 \times 10^5 \text{ Pa} \times 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ mol} \times 273.15 \text{ K}}$$