

高等学校教材

无机化学

华南理工大学无机化学教研室 编

化学工业出版社

教材出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

无机化学/华南理工大学无机化学教研室编. —北京:
化学工业出版社, 2001.9
高等学校教材
ISBN 7-5025-3356-7

I. 无… II. 华… III. 无机化学-高等学校-教材 IV. 061

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 061515 号

高等学校教材

无 机 化 学

华南理工大学无机化学教研室 编

责任编辑: 梁 虹 陈有华

责任校对: 凌亚男

封面设计: 田彦文

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 28 $\frac{3}{4}$ 插页 1 字数 715 千字

2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—4000

ISBN 7-5025-3356-7/G·909

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

我国教育界历来十分重视教材建设工作，这也许是我国学生基础比较扎实、在本专业范围内知识面较宽的原因之一。我国在编写教材时，通常由该学科领域内的资深教授参与或主持，有着严格的审稿和编辑出版制度，集体智慧和经验的综合，保证了教材的基本质量。从历年出版的教材来看，其中不乏精品，化学教材也不例外。在我国优秀教材的历次评选中，都取得过很好的成绩，重视教材的质量已经成为我国教育界和出版界的优良传统。

早在 20 世纪 80 年代后期，结合科学技术发展和社会经济发展的形势，国际化学界就已经广泛地开展着有关化学教学改革的反思和研讨活动，提出过不少新的见解和改革方案，其中包括教材的改革问题。如，如何使学生产生兴趣、如何使教材更具有时代感、如何体现“贴近生活，贴近社会”的原则等等。我国在国家教委和理工科化学教学指导委员会的指导下，也及时组织力量从事收集国际化学教改动态，以及结合我国实际进行分析和探索等方面的工作。不少资深教授曾就化学教育体系、课程设置和专业方向等方面，提出过许多非常有见地的意见和建议。有些院校不仅设计了新的教育教学模式，而且进行了试验。在这个过程中，课程的设置和相关教材的建设问题，一直受到极大的关注，不少教师为此投入了大量的时间和精力，取得了很多有益的经验。尽管其间也有过一些失败的教训，曾经受到过同行的诚挚而痛切的批评，但是却因此使得化学界得以摆脱几十年来在教学改革中存在着的思维惯性的束缚，形成了一个百家争鸣、百花齐放的生动活泼的学术氛围。我想这是今天有更多的人能够如此积极地参加到建设 21 世纪新教材的工作中来的最重要的先决条件之一。

关于化学教学改革方案，有两种不同的思路。一种方案以保持四门化学的独立设课、分别讲授为特点。它要求在强化每门课程的改革的同时，重视四门课程之间的联系与综合。另一种方案则主张按照课程的性质和内在联系，或两两合并、或将四门课综合为一门课程。无论哪一种方案都有利于化学教学的改革进程，都应当给以支持和鼓励。

课程的合并与否，如果仅仅着眼于课程的门数、学时数和教材的套数，并非当前化学教学改革的关键，至少不应当是着力点之所在。如何认真地从大量的化学素材中梳理出那些在基础化学学习阶段最基本、最核心和最具有启迪作用的知识，组成一个最有利于学生自学和复习之用的体系，并在此基础上编写出一本既符合少而精原则又有启迪作用，并且具有明显的时代特征的教材，可能是当务之急。如果考虑到，即使化学进一步发展到像目前纳米技术家们所预言的那样，达到能够真实地操纵或控制单个或多个原子（或分子）的程度，在实现分子设计、材料设计和仿生技术等等设想时，分析和合成将仍然是化学最实际和最基本的任务的现实，它们在化学教育和教学改革中应当进一步得到强化，而不是削弱，不应当代以大量具体的、不难从现有的信息资源中获取的化学知识。化学在改造世界方面（如合成新化合物）的独特作用，正是由化学的学科本质所决定的，这已经成为学术界的共识。

化学工业出版社在新世纪之初，为了适应与化学化工有关专业教学改革形势的需要，在全国范围内约请了多位资深教授，拟订了重新编写四门化学教材的计划。这是很有意义的一项方案，它将有力地继续推动工科化学教学改革的前进。这套教材的作者中，有不少人曾经参与过或领导过化学教材的编写或审定工作，有着丰富的教材建设方面的经验，同时又能把

握住在近 20~30 年间化学和相关学科及技术的发展轨迹，为在新教材中把新发现、新概念、新理论和新技术添加到作为基本概念、基本理论和基本技术的知识载体之中，使得新教材具有强烈的时代气息。也为实现更好地符合贴近生活和贴近社会、培育创新意识等原则的改革目标，提供了有力的保证。正因为如此，新教材将在使读者的视野更加开阔并保持创新思维的持续萌生方面，起到重要的作用。不过要真正做到这点，还要靠广大教师和学生的创造性教学活动，所以也不应当对教科书的功能有过高的和不切实际的要求。但是决不能因此而降低对于优秀教材的基本要求。

编写新教材的工作，是一项十分艰苦、富有创造性的劳动，可以产生重大的社会效益，理应得到社会各界的支持和鼓励，更需要同行和广大师生的关心和爱护。应当认为，严肃的批评和建设性的意见都是对于作者的真心实意的爱护。

作为同行和读者之一，我迫切地希望见到更多更好的、为广大师生所喜爱的优秀教材的问世。

宋心琦于清华园

2001 年早春

前 言

化学作为一门中心学科，在社会的进步和科技的发展过程中起着举足轻重的作用。现代社会的一切文明，包括航空航天技术、尖端军事技术、原子能工业、通讯、交通、建筑、能源、环境工程、生物工程等等，以至于人类的衣、食、住、行、用，无不依赖于化学工业提供的物质基础。与此同时，化学自身也在不断地发展、完善，并交叉、渗透到各个领域。化学的研究范围不断扩大，也派生出了许多新的交叉学科，如能源化学、环境化学、生物化学、材料化学、地球化学、星际化学等。这一切都说明化学是基础学科，也是一门生机勃勃、大有希望的学科。

对于化工类各专业（包括应用化学专业）的本科学生来说，学好无机化学这门课程是十分重要的。为配合国家高等教育的改革，培养基础扎实、知识面广、能力强、思维开阔的面向 21 世纪的高素质创新人才，本教材在选材上力求做到内容的基础性、科学性、先进性、新颖性。在保证无机化学的基本原理、基本知识的基础上，紧密结合和突出化学与当今各科学技术领域的联系，介绍化学在能源、环境、材料、生命科学里的应用。

本教材分上、中、下三篇。

上篇——化学原理。它由两大知识面组成，其一，是物质结构与性质，包括原子结构与元素周期系，化学键与分子结构、晶体结构，配位化学。其二，是化学反应的基本规律和基本理论，包括化学动力学，化学热力学及其相关的化学平衡——溶液中的离子平衡、沉淀与溶解平衡、氧化还原反应平衡和配位平衡。在突出重点的同时，介绍一些理论联系实际的实际。如，在实际生产中如何利用化学平衡和化学反应速率来合理地选择反应进行的条件，以培养学生分析问题和解决问题的能力。

中篇——元素化学。着重介绍一些重要的物质（单质和化合物）的性质、制备和应用，并结合化学的基本原理以及物质结构的理论对其性质加以解释，同时根据物质的性质，介绍它在一些新领域、新技术中的应用。

下篇——继往开来的无机化学。以现代化学的基本知识和基本原理为主线，贯穿可持续发展的思想，阐述化学与当今社会特别关注的能源、环境、材料和生命科学等学科的交叉内容。

本书在编写时特别注意以下几点。

1. 注重内容的系统性、严谨性。
2. 贯彻理论联系实际的原则，系统阐述本课程的基本理论基本知识的同时，重视学科发展的新动态，适当加入如飞秒化学、超分子化学、分子工程学、绿色化学、纳米技术和材料等新的信息和技术。
3. 本书采用了 1988 年 IUPAC 建议的分族方法，把元素周期表从左到右依次分成 18 个族。并把常见周期表中的镧系元素（57 号镧～71 号镥）中的镥、锕系元素（89 号锕～103 号铹）中的铹，定位在第 3（Ⅲ）族，不再属于镧系、锕系元素之内。
4. 认真贯彻使用《中华人民共和国法定计量单位》规定的符号和单位。

本书最初的构想和编排由谷云骊提出，最后内容的选定、统稿和修改由李朴完成。参加

编写工作的有谷云骊（绪论、第 18 章）、李朴（第 1、2、4、19 章，以及第 9 章中的稀有气体）、魏小兰（第 3、12、14、22 章，以及第 9 章中的卤素）、邹智毅（第 5、6、8、10 章）、于书平（第 7、11、13、20 章）、柳松（第 15、16、17 章）、刘海洋（第 21 章）。全书由古国榜教授详细审阅，并提出了许多宝贵的意见，化工出版社为本书的编辑出版做了大量的工作，在此谨向他们致以诚挚的谢意。

此外，本书在编写时也曾参考了兄弟院校的教材和公开出版的书刊中的有关内容，在此对有关的作者和出版社表示衷心的感谢。

限于编者的水平，本书虽经多次修改，但难免有错误和不妥之处，敬请同行和读者批评指正。

编者于华南理工大学

2001 年 2 月

目 录

绪论	1
0.1 关于化学的一般性问题	2
0.1.1 化学的定义	2
0.1.2 无机化学的范畴、地位和作用	2
0.1.3 无机化学学习方法	3
0.1.4 化学与可持续发展——绿色化学的诞生	4
0.2 化学的计量	5
0.2.1 物质的量	5
0.2.2 反应进度	5
0.3 物质的聚集状态	7
0.3.1 理想气体状态方程和分压定律	8
0.3.2 液体的蒸气压	9
0.3.3 溶液的性质和拉乌尔定律	10
0.3.4 系统、环境和相	11
思考题	12
习题	12

上篇 化学原理

第1章 原子结构与元素周期系	13
1.1 核外电子的运动状态	13
1.1.1 氢原子光谱和玻尔模型	13
1.1.2 核外电子运动的波粒二象性	15
1.1.3 核外电子运动状态的近代描述	16
1.1.4 核外电子运动状态小结	20
1.2 原子核外电子排布和元素周期系	20
1.2.1 多电子原子的能级	20
1.2.2 核外电子排布规律	23
1.2.3 原子的电子层结构与元素周期系	28
1.3 原子结构与元素的性质	30
1.3.1 有效核电荷	30
1.3.2 原子半径	30
1.3.3 电离能	31
1.3.4 电子亲和能	32
1.3.5 电负性	33
1.3.6 元素的金属性和非金属性	33
1.3.7 氧化态	35

思考题	35
习题	36
第2章 分子结构	38
2.1 共价键	38
2.1.1 现代价键理论	38
2.1.2 共价键的特征	40
2.1.3 共价键的类型	41
2.1.4 共价键参数	41
2.2 杂化轨道理论与分子的几何构型	44
2.2.1 sp 杂化	44
2.2.2 sp^2 杂化	45
2.2.3 sp^3 杂化	45
2.2.4 不等性杂化	46
2.3 价层电子对互斥理论	47
2.4 分子轨道理论	50
2.4.1 分子轨道理论的要点	51
2.4.2 分子轨道的形成	51
2.4.3 分子轨道的能级	52
2.4.4 分子轨道理论的应用	53
2.5 分子间力	55
2.5.1 分子的极性	55
2.5.2 分子的极化和变形性	56
2.5.3 分子间力	56
2.5.4 氢键	58
2.5.5 超分子化学	59
思考题	60
习题	61
第3章 晶体结构	63
3.1 晶体的基本知识	63
3.1.1 晶体的宏观特性	63
3.1.2 晶体的微观结构	63
3.1.3 单晶体和多晶体	65
3.1.4 晶体的基本类型	66
3.2 离子晶体	66
3.2.1 离子键和离子晶体的性质	66
3.2.2 离子晶体中最简单的结构类型	68
3.2.3 半径比规则	69
3.3 原子晶体和分子晶体	71

3.3.1 原子晶体	71	5.2.2 溶液的酸碱性和 pH	120
3.3.2 分子晶体	72	5.2.3 酸碱指示剂	120
3.4 金属晶体	72	5.3 弱电解质的电离平衡	121
3.4.1 金属晶体的结构	72	5.3.1 一元弱酸弱碱的电离	121
3.4.2 金属键	73	5.3.2 同离子效应和盐效应	124
3.5 混合晶体	73	5.3.3 多元弱酸的电离	124
3.6 离子的极化	74	5.3.4 强电解质及其电离	125
3.6.1 离子的极化作用和变形性	74	5.4 缓冲溶液	127
3.6.2 离子极化对物质结构和性质的 影响	75	5.4.1 缓冲作用原理	127
3.7 晶体的缺陷	76	5.4.2 缓冲溶液的 pH	127
3.7.1 晶体的缺陷	76	5.4.3 缓冲溶液的选择和应用	128
3.7.2 非整比化合物	77	5.5 盐类的水解	129
思考题	77	5.5.1 弱酸强碱盐的水解	129
习题	78	5.5.2 弱碱强酸盐的水解	131
第 4 章 化学反应速率和化学平衡	80	5.5.3 弱酸弱碱盐的水解	131
4.1 化学热力学初步	80	5.5.4 多元弱酸盐的水解	132
4.1.1 基本概念和术语	80	5.5.5 影响盐类水解的因素	132
4.1.2 热力学第一定律和热化学	81	5.5.6 盐类水解的抑制与应用	133
4.1.3 化学反应的方向	85	5.6 有关电离平衡的计算示例	133
4.2 化学反应速率	89	思考题	137
4.2.1 化学反应速率的概念和表示 方法	89	习题	137
4.2.2 反应速率理论	91	第 6 章 沉淀反应	139
4.2.3 影响反应速率的因素	93	6.1 溶度积原理	139
4.3 化学平衡	99	6.1.1 溶度积	139
4.3.1 可逆反应与化学平衡	99	6.1.2 溶度积与溶解度的互相换算	139
4.3.2 平衡常数	100	6.1.3 溶度积规则	141
4.3.3 多重平衡规则	103	6.2 难溶电解质沉淀的生成与溶解	141
4.3.4 化学平衡移动	103	6.2.1 沉淀的生成	141
4.3.5 有关化学平衡的计算示例	107	6.2.2 同离子效应	141
4.4 化学反应速率和化学平衡在工业 生产中综合应用的实例	109	6.2.3 盐效应	142
4.4.1 接触法制硫酸	109	6.2.4 溶液 pH 对沉淀反应的影响	142
4.4.2 氨氧化法生产硝酸	110	6.2.5 沉淀的溶解	143
思考题	111	6.3 分步沉淀和沉淀转化	145
习题	113	6.3.1 分步沉淀	145
第 5 章 电离平衡	115	6.3.2 沉淀的转化	146
5.1 酸碱理论	115	6.4 有关沉淀反应的计算示例	146
5.1.1 酸碱的电离理论	115	思考题	149
5.1.2 酸碱的质子理论	115	习题	150
5.1.3 酸碱的电子理论	118	第 7 章 氧化还原反应 电化学基础	151
5.2 溶液的酸碱性	119	7.1 氧化还原反应	151
5.2.1 水的电离	119	7.1.1 氧化态	151
		7.1.2 氧化剂和还原剂	152
		7.1.3 氧化还原反应方程式的配平	152
		7.2 原电池	154

中篇 元素化学

7.2.1 原电池的概念	154	第9章 卤素 稀有气体	201
7.2.2 原电池的表示方法	155	9.1 卤素的通性	201
7.2.3 原电池的电动势	155	9.2 卤素的单质	202
7.3 电极电势	156	9.2.1 物理性质	202
7.3.1 金属电极电势的产生	156	9.2.2 化学性质	203
7.3.2 电极电势的确定	156	9.2.3 卤素的制备	204
7.3.3 能斯特方程	158	9.3 卤化氢和卤化物	206
7.4 电极电势的应用	161	9.3.1 卤化氢	206
7.4.1 判断氧化剂和还原剂的相对 强弱	161	9.3.2 卤化物	207
7.4.2 判断氧化还原反应的方向	161	9.4 卤素的含氧化合物	208
7.4.3 离子-电子法配平氧化还原反 应方程式	162	9.4.1 卤素的氧化物	208
7.4.4 判断氧化还原反应进行的程度	162	9.4.2 卤素含氧酸的通性	209
7.4.5 元素电势图	163	9.4.3 氯的含氧酸及其盐	211
7.5 有关氧化还原反应的计算示例	165	9.4.4 溴和碘的含氧酸及其盐	213
7.6 电解与电镀	166	9.5 拟卤素	214
7.6.1 电解	166	9.5.1 拟卤素及其通性	214
7.6.2 电镀	168	9.5.2 氰、氰化氢和氰化物	215
7.7 化学电源	168	9.5.3 硫氰、硫氰酸和硫氰酸盐	215
7.7.1 干电池	168	9.5.4 氧氰、氰酸和氰酸盐	215
7.7.2 燃料电池	171	9.6 稀有气体	216
思考题	172	9.6.1 稀有气体发现简史	216
习题	172	9.6.2 稀有气体的存在和分离	216
第8章 配位化合物	175	9.6.3 稀有气体的性质和用途	217
8.1 配合物的基本概念	175	9.6.4 稀有气体化合物	218
8.1.1 配合物的定义	175	9.6.5 稀有气体化合物的结构	219
8.1.2 配合物的组成	175	思考题	219
8.1.3 配合物的化学式和命名	177	习题	220
8.2 配合物的化学键理论	178	第10章 氧族元素	222
8.2.1 价键理论	178	10.1 氧族元素通性	222
8.2.2 晶体场理论	182	10.2 氧及其化合物	223
8.3 螯合物	190	10.2.1 氧的单质	223
8.3.1 螯合物的概念	190	10.2.2 氧的化合物	225
8.3.2 螯合物的特性和应用	191	10.3 硫及其化合物	228
8.3.3 配合物(包括螯合物)的中心 离子在周期系中的分布	191	10.3.1 硫的单质	228
8.4 配位平衡	192	10.3.2 硫化物和多硫化物	229
8.4.1 配合物的不稳定常数和稳定 常数	192	10.3.3 硫的含氧化合物	232
8.4.2 应用不稳定常数的计算	194	思考题	240
思考题	199	习题	240
习题	199	第11章 氮族元素	242
		11.1 氮族元素通性	242
		11.2 氮及其化合物	242
		11.2.1 氮气及其特殊稳定性	242

11.2.2 氨和铵盐	244	13.3 锆、锡、铅	288
11.2.3 氮的含氧化合物	247	13.3.1 锆、锡、铅的冶炼、性质及用途	288
11.2.4 叠氮酸和氮化物	251	13.3.2 锡、铅的氧化物及其水合物	291
11.3 磷及其化合物	252	13.3.3 锡、铅的卤化物	293
11.3.1 磷单质	252	13.3.4 锡、铅的硫化物	294
11.3.2 磷的含氧化合物	253	13.3.5 硫酸铅	295
11.3.3 磷的氢化物和卤化物	256	思考题	295
11.4 砷、锑、铋	257	习题	295
11.4.1 砷、锑、铋的单质	257	第 14 章 碱金属 碱土金属	297
11.4.2 砷、锑、铋的氧化物及其水合物	258	14.1 金属的概述	297
11.4.3 砷、锑、铋的盐类	259	14.1.1 金属的分类	297
11.4.4 砷的氢化物	260	14.1.2 金属的自然存在	297
思考题	260	14.1.3 金属的冶炼	298
习题	261	14.1.4 金属的物理性质	299
第 12 章 碳 硅 硼	263	14.1.5 金属的化学性质	299
12.1 概述	263	14.1.6 合金	299
12.2 碳、硅、硼的单质	264	14.2 碱金属和碱土金属的通性	301
12.2.1 碳的同素异形体	264	14.2.1 概述	301
12.2.2 活性炭和碳纤维	266	14.2.2 单质的主要性质	302
12.2.3 单质硅	267	14.3 碱金属和碱土金属的氢化物	303
12.2.4 单质硼	269	14.4 碱金属和碱土金属的氧化物及氢氧化物	304
12.3 碳的重要化合物	270	14.4.1 氧化物	304
12.3.1 碳的氧化物	270	14.4.2 氢氧化物	305
12.3.2 碳酸及碳酸盐	272	14.5 碱金属和碱土金属的盐类	307
12.3.3 碳化物	273	14.5.1 通论	307
12.4 硅的重要化合物	274	14.5.2 碳酸盐	308
12.4.1 硅的氢化物——硅烷	274	14.5.3 硫酸盐	309
12.4.2 硅的卤化物	274	14.6 硬水及其软化	309
12.4.3 硅的含氧化合物	275	14.6.1 硬水	309
12.4.4 硅酸盐	276	14.6.2 硬水的软化	310
12.5 硼的重要化合物	277	14.7 镁、锂的相似性 对角线规则	311
12.5.1 硼的氢化物——硼烷	277	14.7.1 镁、锂的相似性	311
12.5.2 硼的卤化物	278	14.7.2 对角线规则	311
12.5.3 硼的含氧化合物	279	思考题	311
12.6 硼和硅的相似性	281	习题	312
思考题	281	第 15 章 过渡元素 (一)	314
习题	282	15.1 过渡元素的通性	314
第 13 章 铝 锆 锡 铅	284	15.1.1 元素的原子结构	314
13.1 概述	284	15.1.2 过渡元素的性质	315
13.2 铝及其化合物	284	15.2 钛族	317
13.2.1 铝的单质	284	15.2.1 金属钛	317
13.2.2 铝的重要化合物	285	15.2.2 钛的重要化合物	317
13.2.3 铍、铝的相似性	287		

15.2.3 锆的性质和用途	318
15.3 钒族	318
15.3.1 金属钒	318
15.3.2 钒的重要化合物	319
15.3.3 铌和钽	320
15.4 铬族	320
15.4.1 金属铬	321
15.4.2 铬的重要化合物	321
15.4.3 钼和钨	323
15.5 锰族	324
15.5.1 金属锰	324
15.5.2 锰的氧化物和氢氧化物	324
15.5.3 锰的盐类	325
15.6 铁系元素	327
15.6.1 铁系元素的一般性质	327
15.6.2 铁的重要化合物	327
15.6.3 钴和镍的重要化合物	330
15.7 铂系元素	332
15.7.1 铂族金属的性质和用途概述	332
15.7.2 铂、钯的重要化合物	333
思考题	334
习题	335
第 16 章 过渡元素 (二)	337
16.1 铜族	337
16.1.1 铜族单质	337
16.1.2 铜的化合物	339
16.1.3 银的重要化合物	342
16.2 锌族	344
16.2.1 锌族单质	345
16.2.2 锌的主要化合物	345
16.2.3 汞的主要化合物	346
思考题	348
习题	349
第 17 章 镧系和铜系元素	351
17.1 镧系元素的通性	351
17.1.1 双峰效应和镧系收缩	351
17.1.2 氧化态	352
17.1.3 离子的颜色	353
17.1.4 磁性	353
17.1.5 化学活泼性	354
17.2 稀土元素的重要化合物	354
17.2.1 氧化物和氢氧化物	354
17.2.2 盐类	355
17.2.3 配合物	355

17.3 稀土元素的分离	356
17.3.1 溶剂萃取法	356
17.3.2 离子交换法	357
17.4 稀土元素的应用	357
17.4.1 在冶金工业中的应用	357
17.4.2 在石油化工方面的应用	358
17.4.3 在玻璃陶瓷工业中的应用	358
17.4.4 在新材料方面的应用	358
17.5 铜系元素的通性	358
17.6 放射性同位素	360
17.7 钍和铀的化合物	360
17.7.1 钍的化合物	361
17.7.2 铀的化合物	361
17.8 原子核反应	362
17.8.1 放射性元素蜕变	362
17.8.2 粒子轰击原子核	362
17.8.3 核裂变反应	363
17.8.4 热核反应	363
习题	363

下篇 继往开来的无机化学

第 18 章 无机化学的发展	364
18.1 配位化学的发展与元素分离	364
18.1.1 现代配位化学的发展	364
18.1.2 元素分离	366
18.2 有机金属化学	368
18.2.1 有机金属化合物分类	369
18.2.2 金属羰基化合物	370
18.2.3 金属-不饱和烃化合物	372
18.2.4 金属夹心配合物	373
18.3 生物无机化学	375
18.3.1 生物无机化学研究的对象	375
18.3.2 生物无机化学的任务	375
18.4 无机固体化学	377
思考题	378
第 19 章 水和大气	380
19.1 水、大气与人类	380
19.1.1 水的结构与性质	380
19.1.2 水与人类	381
19.1.3 大气的成分 大气圈	381
19.1.4 大气与人类	382
19.2 水体污染与治理	383
19.2.1 我国水体污染的现状	383
19.2.2 重金属污染的治理	385

19.2.3 有机污染物的治理	387	21.2.3 酶的催化功能与构效关系	408
19.3 水资源	388	21.3 生物模拟	410
19.3.1 水资源的合理利用	388	21.3.1 固氮	410
19.3.2 海水淡化	389	21.3.2 氧载体	413
19.3.3 水的纯化与形形色色的商业 饮用水	391	21.3.3 氧化还原酶	417
19.4 大气污染的治理	392	21.3.4 生物模拟与未来的化学工业	420
19.4.1 我国大气污染的现状	392	思考题	420
19.4.2 臭氧层的破坏与保护	393	第 22 章 无机材料	421
19.4.3 二氧化碳与温室效应	394	22.1 无机功能材料	421
19.4.4 光化学烟雾的形成与治理	394	22.1.1 形状记忆合金	421
19.4.5 酸雨的形成与防治	395	22.1.2 减振合金	422
19.5 环境保护与可持续发展	397	22.1.3 贮氢合金	423
19.5.1 可持续发展——人类惟一的 选择	397	22.1.4 电学材料	424
19.5.2 我国的环境保护与可持续发展 战略	397	22.1.5 光学材料	427
思考题	397	22.1.6 磁性材料	429
第 20 章 氢——21 世纪最有希望的能源	399	22.2 特种金属结构材料	430
20.1 氢的结构、性质与存在	399	22.2.1 轻质合金	430
20.1.1 氢的结构与性质	399	22.2.2 硬质合金	431
20.1.2 氢的化学性质	399	22.2.3 超低温合金	431
20.1.3 氢的存在	400	22.2.4 耐高温合金	432
20.2 氢能源	401	22.3 新型陶瓷材料	433
20.2.1 能源的现状	401	22.3.1 透明陶瓷	433
20.2.2 氢能源	402	22.3.2 生物陶瓷	433
20.2.3 氢气的制备	402	22.3.3 纳米陶瓷	433
20.2.4 氢气的贮存和输送	404	22.4 无机材料的未来	434
20.2.5 氢能用途	404	思考题	434
思考题	405	附录	436
第 21 章 生物酶与生物模拟	406	附录 I 有关计量单位	436
21.1 生命元素	406	附录 II 一些物质的标准热力学函数的数据 (298.15K, $p^{\ominus} = 100\text{kPa}$)	438
21.2 生物酶	406	附录 III 标准电极电势 (298.15K)	440
21.2.1 酶的化学本质和特性	406	附录 IV 本书常用的符号意义和单位	444
21.2.2 酶的命名与分类	407	主要参考文献	446
		元素周期表	

绪 论

人类赖以生存的世界乃至人本身是由物质组成的。凡涉及到物质的问题，便涉及到化学。

自道尔顿 (J. Dalton, 1766~1844) 原子论确立以来的约 200 年间，人们从探索物质变化的宏观规律，进而揭示微观粒子的奥秘，使化学科学得到了极大的发展。随之而来的是新技术、新工艺、新材料的大量涌现。现代科学的方方面面都与化学的进步密不可分，化学改变了世界的面貌。现代社会的一切物质文明，包括现代航天航空技术、尖端军事技术、原子能工业、现代通讯技术、IT 业、交通、能源、建筑、生物工程等等，以及人类的衣、食、住、行、用，都有赖于现代化学工业提供物质基础——新材料。化学已成为现代科学技术和社会生活的一个枢纽。当今的科学界称化学为“一门满足社会需要的中心科学”。

一个多世纪以来，化学大致形成了无机化学、有机化学、分析化学和物理化学四大分支。从研究领域和科学概念上讲，20 世纪化学的一些重大成就可以罗列出以下几个方面：化学合成、药物发明、聚合物、泡沸石、超导和富勒烯；化学研究的各种光谱、波谱、能谱、质谱分析仪器和激光技术以及化学键的理论等。化学发展的一个重要表现是新分子新材料以指数函数飞速增长，平均每天发现和合成 7000 多种新化合物。同时，化学的研究范围扩展到星际化学、地球化学、环境化学、能源化学、材料化学和生物化学等等。

现代化学的发展已经处于从宏观深入到微观、从定性走向定量、从描述过渡到推理、从静态推进到动态的发展阶段。从原子分子论到量子化学，从最初的简单无机、有机合成到今天的一千多万种新化合物，化学家一直在努力探讨分子本身的结构、合成与性能。再复杂的分子如维生素 B₁₂、海葵素等，都已被合成出来。即使是结构十分复杂的生物活性物质如核酸、蛋白、糖等的分子结构，也逐渐被弄清楚。近年来，化学更从对原子、分子的研究为重点转向更多地注意分子间的相互作用以及分子聚集体的研究。诸如分子工程、凝集态化学和物理、超分子、纳米材料以及团簇物质等，都属于这方面的内容。不仅如此，化学除了在不断地完善、修正、发展已取得的大量成果外，更重要的是它与其他学科发生了交叉、渗透、融合。化学作为自然科学的中心学科，是在与其他许多学科相互交叉和渗透中得到发展的。今天，化学与物理、化学与生物学的界限越来越不明显。越来越多的重大成果出自交叉学科。化学在与物理学、生物学、生命科学、环境科学、材料科学、医学等的相互交叉、渗透过程中，不仅自身得到了完善和发展，还推动这些学科乃至整个社会的物质文明和精神文明的发展。

纵观历史，化学已经经历了两次革命，第一次化学革命成果是化学反应理论；第二次是化学结构理论。人们预言未来的化学革命将是物质的化学功能的理论，其标志可能是“分子工程学理论”的诞生。

新世纪伊始，人们自然地要缅怀过去，展望未来。当我们津津乐道 20 世纪所创造的辉煌的同时，还不得不面对这样的严峻事实——全球性资源短缺、环境污染和生态破坏。进入到 20 世纪的最后 10 年，没有哪个名词像“可持续发展”这样，在短短的数年之内便风靡全球，并广泛地为人们所接受。无论是发展中国家还是发达国家，对“可持续发展”均表现出

强烈的认同感。所谓“可持续发展”是人们在一系列严峻的挑战面前，经过对传统的价值观和发展观进行了一系列深刻反思之后，从经济、社会、环境、科技、文化等广泛的系统的高度审视人类的前途，就社会、经济发展与生态环境相协调所达成的共识。“可持续发展”目前的定义为：“满足当代人的需求又不损害子孙后代需要的发展”。

“可持续发展”是全球性的发展战略，它的相当部分内容与化学息息相关，因而赋予化学以新的思维与观点。社会发展对化学提出了新的更高的要求，我们这一代化学工作者将责无旁贷地要肩负起历史的重任。

0.1 关于化学的一般性问题

0.1.1 化学的定义

化学是一门自然科学。凡自然科学，其研究对象都是运动的物质，即研究物质的运动形式。物质的运动形式是多方面、多层次的。化学主要研究物质的化学运动，即化学变化，而且是在分子、原子、离子层次上来展开的。

物质的化学变化是物质的特殊属性，它与物质的组成、结构、性质密切相关。同时外部条件如温度、压力等也能影响化学变化。所有这些内因和外因，赋予了化学变化很丰富的内容。因此，我们可以说，化学是在分子、原子、离子层次上研究物质的组成、性质、结构及反应规律的一门科学。

化学作为自然科学中的一门基础学科，具有其自身的特征，这主要表现在它的实验性、理论性和应用性。

化学是建立在原子、分子学说上的一门实验科学，它从物质自身特点的变化中了解物质的组成、结构和性能。同时，又从物质的组成、结构和性能的分析中进一步认识物质自身的特点和变化。所有这些探索过程，都是以实验作为基础的。化学不仅是一门实验性强的科学，还要求实验的手段要先进。近几十年来，不断更新的物理手段在物质的组成、结构、成键、性能等不同层次研究领域的广泛应用，是化学得以迅速发展的重要因素之一。

化学的发展经历了漫长的时期，而真正走出“实用化学”阶段要归功于19世纪初道尔顿原子论的确定。又过了一个世纪，化学理论从探索物质运动的宏观规律进入到研究微观粒子的运动规律。今天，化学已形成了其自身较为完整的理论体系。这些理论不仅可以说明物质的结构、性质、反应以及它们之间的相互关系及规律，更重要的是可以指导大量新物质的合成。人类认识客观世界是没有穷尽的，化学理论的完善和发展一天也不会停止，化学是21世纪最有希望的科学之一。

与其他学科相比，化学与工业部门的联系更直接、更明显。长期以来，直接以化学学科为根基的工业部门就已有：冶金（材料）工业和化学工业（化工）。前者以资源导向，后者以产品导向。而化学家则以发现新物质为使命，这些新物质，即化合物的发现为筛选新材料、新药物、新农药、新能源等提供了广阔的天地。当前一些重大的工业生产过程基本上都基于化学过程。例如，钢铁冶炼、水泥陶瓷、肥料、塑料橡胶、合成纤维、染料、炸药、医药、农药、日用化妆品等。世界上近20%的发明专利来源于化学领域的发明和创造。这不仅说明了化学这一学科的应用性，更反映了这一学科的先进性和前沿性。

0.1.2 无机化学的范畴、地位和作用

无机化学是研究元素及其化合物的结构、性质、反应、制备及其相互关系的一门化学分支。准确地讲，除去碳氢化合物和其大多数衍生物外，无机化学是对所有元素及其化合物的

性质和反应进行实验研究和理论解释的科学。

人类最早接触到的化学知识便是无机化学。据历史记载，中国、埃及、印度等国早在公元前就利用了不少化学知识，如金属冶炼、玻璃制造以及陶器、印染技术的广泛应用就是证明。我国早在公元前 8000 年，即新石器时代早期，便已开始陶器制造。15 世纪中期以来，人类逐渐积累了较多的无机化学知识，这是无机化学成为化学重要组成部分和分支学科的萌芽阶段。18 世纪后半期到 19 世纪初期，无机化学进入第二级段，这一时期无机化学已成为化学的一个重要的独立分支，有了很大的发展。

这个阶段先后有质量守恒定律 [1748 年，罗蒙诺索夫 (M. B. Ломоносов, 1711 ~ 1765)] 和科学的原子论基础 [1808 年，道尔顿 (J. Dalton, 1766 ~ 1844)] 的确立。接着，阿伏加德罗 (A. Avogadro, 1776 ~ 1856) 确立了分子论 (1811 年)，盖斯 (G. H. Hess, 1802 ~ 1850) 确立了盖斯定律 (1840 年)，门捷列夫于 1869 年创立元素周期律，奠定了无机化学的理论基础。到 1869 年，共发现了 63 种化学元素。

19 世纪末期到 20 世纪 30 年代，由于有机化学理论和有机合成的蓬勃兴起，加之这期间无机化学在理论和实践方面并无大的突破，相形之下，无机化学落后了约 30 年。

无机化学的再次飞跃是从 20 世纪 40 年代开始的。随着工农业规模的飞速扩大和科学技术发展的有力推动，对有特殊性能的无机新材料的需求日益增多，无机化学因而得到很快发展。特别是进入 50 年代以后，由于现代物理方法诸如光学、电学和磁学等测试仪器和技术的出现和发展，人们对无机化合物的结构和变化规律有了比较系统的认识。无机化合物的结构数据、热力学和动力学数据不断积累，各种无机化学反应规律相继得以总结，并在此基础上建立了庞大的现代无机工业体系，再加上无机化学的一个新兴领域——配合物化学的蓬勃兴起和广泛应用，使无机化学进入了复兴阶段。

无机化学在化学学科中的重要地位，不仅仅是因为它是最早形成的化学学科，更重要的是它的基本理论如原子结构理论、分子结构理论、酸碱理论、电离理论、电化学理论等，也是其他化学学科如有机化学、分析化学及物理化学不可缺少的基础理论。因此，学习化学要从学习无机化学开始。

近几年来，无机化学一方面继续自身的发展，另一方面一直在进行着与其他学科的交叉和渗透。如无机化学与有机化学交叉形成了有机金属化学；无机化学与固体物理结合形成了无机固体化学，无机化学向生物学渗透形成了生物无机化学，等等。事实上，无机化学已经在材料、能源、信息、环保、生命科学及生物模拟等领域起着举足轻重的作用。不仅如此，无机化学的作用还将体现在上述各领域在 21 世纪的发展和突破之中。可以预见，无机化学将在科学发展和社会进步的进程中，发挥愈来愈重要的作用。

0.1.3 无机化学学习方法

化学是一门基础科学，而无机化学则是基础中的基础。具体来讲，学习无机化学时，应注意以下几个方面。

(1) 关于化学原理部分的学习

化学原理部分主要介绍无机化学的基本理论，诸如原子结构、分子结构、晶体结构、化学反应速率、化学平衡、电离平衡、沉淀反应及电化学平衡等。这些基础知识不仅是无机化学的基础，更是属于整个化学学科的基础。同时，也是化学工作者终生藉以工作的基础，故同学们在学习时应力求全面掌握。换言之，学好无机化学的基本理论，作为化学工作者将受益终生。

(2) 关于元素化学部分的学习

元素化学是无机化学的重要内容，主要以元素及其化合物的结构、性质为主线来展开。表面上看，元素化学部分的内容多且复杂，但学习这部分内容时，只要着重注意结构与性质的关系，并运用化学原理部分的基本知识来分析、理解、掌握，知识就会变得清晰和有规律可循。

(3) 理论与实验并重

无机化学的实验性强，也有自身的理论。无机化学设有理论课和实验课，它们是一个整体，互相补充、完善，学习中不能偏废。实验可以加深感性认识，而理论可以加深感性认识的理解。

(4) 一点论与多种解释

所谓一点论是指物质的客观属性，但客观属性可以用不同的观点解释，或不同的方法加以处理。如近代共价键理论就有价键理论和分子轨道理论，而这两种理论中又有多种处理方法，如价键理论中的杂化轨道、共振等。

(5) 注意学科的前沿与发展

本教材的下篇介绍了一些无机化学的新兴领域，这对于拓展知识面，开阔眼界很有帮助。读者应花一定时间作一些了解。

0.1.4 化学与可持续发展——绿色化学的诞生

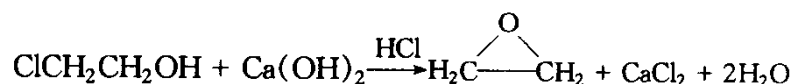
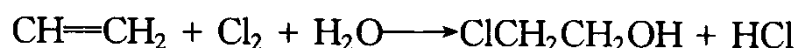
可持续发展已成为全球性的发展战略，而实施这一战略需要化学工作者作出不懈的努力。

当代全球十大环境问题——大气污染、臭氧层破坏、全球变暖、海洋污染、淡水资源紧张和污染、土地退化和沙漠化、森林锐减、生物多样性减少、环境公害、有毒化学品和危险废物中，至少有七个直接与化学和化工产品的化学物质污染有关。我们毋需评说化学的功过，然而有一点是十分清楚的，即这些问题，不可回避地要由化学家来解决。于是，“绿色化学”的概念应运而生。

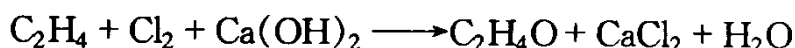
传统的化学虽然可以得到人类需要的新物质，但是在许多场合中，既未有效地利用资源，又产生大量的排放物造成严重的环境污染。“绿色化学”是更高层次的化学，它的主要特点是在获取新物质的转化过程中，充分利用每个原料原子，实现“零排放”。因此既可以充分利用资源，又不产生污染。这种过程称为绿色工艺或清洁生产。试看下面的例子：

环氧乙烷生产中，经典工艺和一步催化反应新工艺的原子利用率很不相同，前者为25%，而后者达到了100%，即理论上没有废物产生，现讨论如下。

经典氯代乙醇法：



总反应：

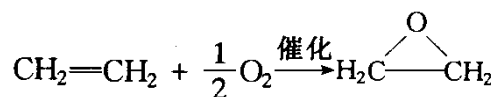


摩尔质量

44 111 18

$$\text{原子利用率} = \frac{44}{173} = 25\%$$

一步催化法



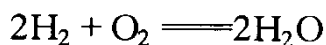
原子利用率 = 100 %

显然，清洁工艺的实现得益于化学家的不懈努力。上面的例子中如果没有开发出合适的催化剂，由乙烯一步氧化为环氧乙烷的工艺是不能实现的。

0.2 化学的计量

0.2.1 物质的量

在物理学中，通常用质量来描述物质质量的多少。在化学中，由于化学反应是分子与分子之间的反应，参与反应的各种分子在数量上存在一定的简单比例关系，故通常采用分子的数量来计量物质的多少。例如：



反应中，2 个 H_2 分子与 1 个 O_2 分子结合成 2 个 H_2O 分子，它们之间在分子数量上存在 2:1:2 的关系。

化学中，规定用“物质的量”来表示某物质的数量，其单位是摩尔（mol）。1mol 某物质表示有 6.023×10^{23} 个该物质的粒子（例如分子、原子、离子或一些“特定”的粒子）。 6.023×10^{23} 就是阿伏加德罗（Avogadro）常数。1mol 某物质的质量称为该物质的摩尔质量 M （单位为 $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ）。按此定义，物质的摩尔质量在数值上等于该物质的相对分子质量[●]。因此 B 物质的物质的量为：

$$n_{\text{B}} = \frac{W_{\text{B}}(\text{g})}{M(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})} \quad (0-1)$$

式中 W_{B} 表示 B 物质的质量，以克为单位。

例如， H_2SO_4 的相对分子质量为 98.0。10.0g 硫酸，以 H_2SO_4 表示时的物质的量为：

$$n(\text{H}_2\text{SO}_4) = \frac{10.0\text{g}}{98.0\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 0.102\text{mol}$$

如果特定的“粒子”为 $\frac{1}{2}\text{H}_2\text{SO}_4$ ，则其物质的量为：

$$n\left(\frac{1}{2}\text{H}_2\text{SO}_4\right) = \frac{10.0\text{g}}{49.0\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 0.204\text{mol}$$

由上可见，同样质量的一种物质，以不同的特定“粒子”表示物质的量时，其数值是不同的。所以物质的量必须注明其“粒子”的符号，才有真实的含义。

0.2.2 反应进度

在研究化学反应的过程中，常需要了解物质的量变化情况。例如，合成氨反应：



如果 N_2 消耗了 0.1mol， H_2 就消耗 0.3mol，而 NH_3 则增加 0.2mol。由于此反应各物质的计量系数不同，以及对反应物来讲是量的减少，对生成物则是量的增加，因而在表示反应过程中量的变化时，用不同的物质来表示将有不同的值。

国际纯粹与应用化学联合会（IUPAC）推荐使用比利时化学家唐德（T. de Donder）提

● 相对分子质量以前称分子量。