



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

无机化学

(第2版)

主 编 张 霞 孙 挺

副主编 韩义德 徐 燕 孟 皓



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

无机化学

(第2版)

主 编 张 霞 孙 挺
副主编 韩义德 徐 燕 孟 皓

北 京

冶金工业出版社

2015

内 容 提 要

全书共 18 章, 前 10 章介绍化学热力学、化学动力学和化学平衡理论的基础知识, 包括酸碱平衡、多相离子平衡、氧化还原反应和配合反应, 原子、分子和晶体结构等; 11 ~ 16 章介绍元素化学; 17 ~ 18 章介绍生物无机化学、化学信息等内容。

本书可作为高等院校一些理工科专业, 如应用化学、化学、冶金、材料、生物等专业的教学用书; 也可作为从事化学、化工及相关专业的科技人员的参考用书。

本书可以选用《无机化学实验》(冶金工业出版社, 2009 年) 与之配套使用。

图书在版编目(CIP)数据

无机化学/张霞, 孙挺主编. —2 版. —北京: 冶金工业出版社, 2015. 8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6975-7

I. ①无… II. ①张… ②孙… III. ①无机化学—高等学校—教材 IV. ①O61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 182792 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 曾 媛 谢冠伦 美术编辑 杨 帆 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6975-7

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京印刷一厂印刷

2011 年 8 月第 1 版, 2015 年 8 月第 2 版, 2015 年 8 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 29.5 印张; 715 千字; 454 页

59.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

第2版前言

“无机化学”是高等院校化学化工类专业本科生的一门专业基础课，也是生命科学、冶金工程、环境科学、材料科学、土木工程学、药学等专业的一门专业必修课。同时，作为大学阶段的第一门化学课程，无机化学既要衔接中学化学知识架构，同时也要为后续化学课程学习奠定知识基础，发挥着承前启后的重要作用。“无机化学”也是东北大学理工科专业必修课。

《无机化学（第2版）》在第1版（冶金工业出版社，2011）的基础上修订完成。第1版教材自出版后，曾被多个高等院校选作本科教材，该书在四年间先后两次印刷。在该书的使用过程中，教师和学生对部分内容提出了很好的修改建议。同时，随着无机化学学科发展，无机化学理论知识与一些相关科学的交叉渗透更加深入。我们感觉有必要对第1版教材进行相应改动以及增补新的内容。

与第1版教材相比较，第2版首先修订了第1版教材中一些不完善的知识要点，增加了各章的例题，同时增加了一些交叉学科的内容。其中包括：增加了富兰克林的酸碱溶剂理论；增加了工业上常用的pH电势图以及化学电解；补充介绍了原子结构的发展历史；增加了Slater规则对于原子轨道能量的计算；补充介绍了Lewis电子对成键理论；强化了晶体结构知识，补充介绍X射线对于晶体的衍射效应以及X射线衍射分析的基本原理；元素部分重点增加了多酸化学以及金属有机配合物介绍等相关内容。

《无机化学（第2版）》在内容的选编上依然保持着东北大学学科专业特色，在例题、习题的选择上尽可能结合材料、冶金、化工等学科特点。同时，在教材指导精神上继续贯彻了第1版的指导思想——绿色化学、绿色冶金、资源与能源的合理利用，力求在学习中培养学生的科学思维方式、良好环境生态意识和利用化学理论和知识解决实际问题的能力。教材吸取了国外教材联系生活常识和深入浅出的特点，利用生动有趣的实例激发学生的学习兴趣，同时注重理论与知识的系统性和内在联系。

《无机化学（第2版）》共分为18章，由张霞教授和孙挺教授担任主编，韩义德博士、徐燕博士和孟皓博士担任副主编。其中，张霞教授负责第1~6章的编写，孙挺教授负责第10章的编写，徐燕博士负责第7~9章的编写，韩义德博士负责第11~16章的编写，桑晓光博士负责第17和18章的编写，孟皓博士负责各章习题的编写。此外，张霞教授负责全书的校订工作。本书在编写过程中，得到了东北大学无机化学教研组老师们和研究生的帮助，他们是王林山教授、王毅博士、徐欣欣博士以及刘根、李伟伟和李小雷硕士。本书的出版还得到了东北大学教材出版基金的支持，在此一并表示感谢。

我们希望《无机化学（第2版）》能够同样受到第1版用户的欢迎。由于编者水平所限，加之时间仓促，书中错误在所难免，敬请师生们批评指正。

本书可与《无机化学实验》（冶金工业出版社，2009年）配套使用。

编 者

2015年5月于东北大学

编写说明（第一版）

无机化学是最古老和基础的化学分支科学，是研究元素、单质和无机化合物的来源、制备、结构、性质、变化和应用的科学。无机化学的研究范围极其广阔。化学中最重要的一些概念和规律，如元素、分子、化合、分解、定比定律和元素周期律等，都是无机化学早期发展过程中形成和发现的。当前无机化学正处在蓬勃发展的新时期，研究范围不断扩大。例如，无机化学与有机化学的结合产生了有机金属化合物化学；生物化学与无机化学（特别是配位化学）的结合产生了生物无机化学；固体物理与无机化学的结合产生了无机固体化学；此外还有物理无机化学、无机高分子化学、地球化学等。

现代社会中的三大支柱产业，能源、信息和材料都与无机化学的基础研究密切相关。如太阳能的高效开发需要高效率的以多晶硅为主要材料的太阳能集光和转换装置作基础；高能蓄电池、燃料电池的应用也需特殊的电解质和电极材料；信息的产生、转化、存储、调制、传输、传感、处理和显示都要有相应的信息材料作为材料和器件，这些都是固体无机化学中的新材料的研究内容。而生物无机化学的基础研究方向直接与生命过程相关，它探讨人体中的微量金属离子与蛋白质的配位作用以及金属酶的活性中心对生物功能的影响和在生命过程中的作用。无机化学的各个前沿领域内容十分丰富，它们的新概念、新理论、新方法、新反应、新结构和新的功能，在化学学科的基础研究中具有重要地位，促进了化学及相关科学的发展。

作为化学学科的基础，近代无机化学的建立就是近代化学的创建。它完整和充分体现了化学学科的基本科学方法，即搜集事实、建立定律和创立学说，同时在搜集事实的过程中体现了高超的实验方法和技巧。其思维方式的培养和实验技能的训练对于从事化学、化工、材料、冶金、地质和环境等相关专业的科技人员尤为重要。无机化学课程是东北大学应用化学、冶金工程、环境工程、采矿工程、生物工程、矿物加工和环境科学等专业的必修课程。针对材料、冶金等理工科专业特色，东北大学无机化学课程教学经过几代教师几十年的探索和建设，形成了具有一定特色的教学内容和教学体系。本书的编者均为长期工作在无机化学教学与科研第一线的骨干教师。在本书的编写中也充分汲

取了东北大学的教学经验。在内容设计上,除了化学理论和知识的阐述之外,还从认识论的角度加强了化学发展史的相关内容以及化学思维方式的培养,并根据社会进步和可持续发展观念加入了绿色化学、绿色冶金、资源与能源的合理使用等相关内容,力求在教学中培养学生科学的思维方式、良好的环境生态意识和利用化学理论及知识解决实际问题的能力。教材吸取了国外教材联系生活常识和深入浅出的特点,利用生动鲜活有趣的实例激发学生的学习兴趣,同时注重理论与知识的系统性和内在联系。

本书共分为18章,由孙挺教授和张霞教授担任主编并统稿。编者的分工如下:孙挺教授(第10章),王林山教授(第6章),张霞教授(第7、9章),牛盾副教授(第2、3章),王毅副教授(第12、15、16章),李光禄讲师(第1、4、5章),桑晓光博士(第11、13、14、17、18章),徐欣欣博士(第8章以及第10章的部分工作)。此外,张霞教授和徐欣欣博士负责了全书的校订工作。本书在编写过程中,得到了东北大学无机化学教研组老师们的关心和帮助,在此一并表示感谢!本书的出版还要感谢东北大学教材出版基金的支持。

本书可作为高等院校一些理工科专业,如应用化学、化学、冶金、材料、生物等专业的教学用书;也可作为从事化学、化工及相关专业的科技人员的参考用书。

本书可以选用《无机化学实验》(冶金工业出版社,2009年)与之配套使用。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请使用本教材的老师 and 同学们批评指正。

编 者

2011年2月于沈阳南湖

目 录

1 物质的聚集状态	3
1.1 气体的性质	3
1.1.1 理想气体状态方程式	3
1.1.2 道尔顿气体分压定律	2
1.1.3 真实气体	4
1.2 溶液的性质	6
1.2.1 稀溶液依数性	6
1.2.2 电解质溶液	11
习题	14
2 化学热力学基础	17
2.1 化学反应中的能量关系	17
2.1.1 基本概念	17
2.1.2 化学热力学第一定律	21
2.2 化学反应的热效应	22
2.2.1 恒容反应热	22
2.2.2 恒压反应热和焓	22
2.2.3 热化学方程式	23
2.2.4 盖斯定律	23
2.2.5 标准摩尔生成焓与化学反应的标准摩尔焓变	24
2.2.6 标准摩尔燃烧焓与化学反应的标准摩尔焓变	25
2.3 化学反应的方向	26
2.3.1 化学反应的自发性	26
2.3.2 熵和熵变	27
2.3.3 熵增加原理 (热力学第二定律)	28
2.3.4 吉布斯自由能和化学反应自发过程的判断	28
习题	32
3 化学反应速率与化学反应平衡	35
3.1 化学反应速率	35
3.1.1 化学反应速率的表示方法	35
3.1.2 影响化学反应速率的因素	36

3.1.3 化学反应速率理论简介	40
3.2 化学反应平衡与标准平衡常数	42
3.2.1 化学反应的可逆性与化学平衡状态	42
3.2.2 经验平衡常数	43
3.2.3 标准平衡常数	43
3.2.4 化学反应等温方程式	44
3.2.5 有关平衡常数的计算	45
3.2.6 化学平衡的移动	47
习题	52
4 酸碱平衡	55
4.1 酸碱理论	55
4.1.1 酸碱电离理论	55
4.1.2 酸碱质子理论	55
4.1.3 酸碱溶剂理论	58
4.1.4 酸碱电子理论	59
4.1.5 软硬酸碱理论	59
4.2 弱电解质的解离	61
4.2.1 水的解离平衡	61
4.2.2 弱酸、弱碱的解离平衡	62
4.2.3 多元弱酸的解离平衡	64
4.2.4 解离平衡的移动——同离子效应	65
4.2.5 盐溶液的水解平衡	65
4.3 缓冲溶液	68
4.3.1 缓冲溶液的作用原理	69
4.3.2 缓冲溶液 pH 值计算	69
4.3.3 缓冲溶液的应用	71
习题	72
5 沉淀-溶解平衡	76
5.1 难溶电解质的溶度积和溶解度	76
5.1.1 溶度积常数	76
5.1.2 溶度积和溶解度的换算关系	77
5.2 沉淀的生成及溶度积规则	78
5.2.1 溶度积规则	78
5.2.2 分步沉淀	79
5.2.3 影响沉淀反应的因素	80
5.3 沉淀的溶解反应	85
5.4 沉淀反应应用举例	87

5.4.1 制备难溶化合物	87
5.4.2 去除溶液中杂质	87
5.4.3 离子鉴定	87
习题	89
6 氧化还原平衡	92
6.1 氧化还原反应基本概念	92
6.1.1 氧化数	92
6.1.2 半反应与氧化还原电对	93
6.1.3 氧化还原反应方程式的配平	94
6.1.4 氧化还原反应的应用	95
6.2 原电池	96
6.2.1 原电池组成	96
6.2.2 电池符号	97
6.2.3 电极	98
6.3 电动势与电极电势	99
6.3.1 原电池的电动势	99
6.3.2 电极电势	99
6.3.3 标准电极电势的确定	100
6.4 Nernst 方程	101
6.4.1 原电池电动势与 Gibbs 函数	101
6.4.2 电动势的 Nernst 方程	101
6.4.3 电极电势的 Nernst 方程	102
6.4.4 电极电势的影响因素	103
6.5 电极电势的应用	106
6.5.1 判断原电池的正、负极, 计算原电池的电动势	106
6.5.2 判断氧化剂、还原剂的相对强弱	106
6.5.3 判断氧化还原反应进行的方向	107
6.5.4 判断氧化还原反应进行的程度	108
6.5.5 计算弱酸的解离常数以及难溶电解质的溶度积常数	109
6.5.6 元素电势图及其应用	110
6.6 化学电源	112
6.6.1 干电池	112
6.6.2 蓄电池	113
6.6.3 锂离子电池	113
6.6.4 燃料电池	114
6.7 电解及其应用	114
6.7.1 电解	114
6.7.2 电镀	116

6.7.3 电解抛光	116
6.7.4 阳极氧化	117
6.8 金属腐蚀与防护	117
6.8.1 金属的腐蚀	117
6.8.2 金属腐蚀的防护	118
习题	121
7 原子结构与元素周期律	125
7.1 原子结构理论发展历史	125
7.1.1 原子的提出及原子基本结构的发现	125
7.1.2 氢原子光谱与玻尔氢原子模型	126
7.1.3 玻尔氢原子模型	127
7.2 量子力学原子模型	129
7.2.1 微观粒子运动的特殊性——波粒二象性	129
7.2.2 薛定谔方程	131
7.2.3 薛定谔方程的解	131
7.2.4 4个量子数	132
7.2.5 波函数图形	134
7.2.6 电子云	136
7.3 多电子原子结构	138
7.3.1 多电子原子轨道的能级图	138
7.3.2 多电子原子基态核外电子排布	144
7.4 元素周期律	146
7.4.1 元素周期系与原子的电子层结构	146
7.4.2 元素周期律	148
习题	155
8 分子结构	158
8.1 表征化学键的参数	158
8.2 离子键	160
8.2.1 离子键的形成	160
8.2.2 离子键的特征	161
8.2.3 键的离子性	161
8.3 共价键理论 I——现代价键理论	161
8.3.1 共价键的形成	162
8.3.2 现代价键理论要点	163
8.3.3 共价键的特点	163
8.3.4 共价键的类型	164
8.3.5 杂化轨道理论	166

8.3.6 价层电子对互斥理论	170
8.4 共价键理论 II——分子轨道理论	173
8.4.1 分子轨道的基本概念	173
8.4.2 分子轨道理论的要点	173
8.4.3 分子轨道能级	175
8.4.4 分子轨道理论的应用	177
8.5 金属键理论	179
8.5.1 自由电子理论	179
8.5.2 能带理论	179
8.6 分子间作用力	181
8.6.1 分子的极性和变形性	182
8.6.2 分子间力	184
8.6.3 氢键	185
习题	188
9 晶体结构	190
9.1 晶体和非晶体	190
9.1.1 晶体的内部结构	190
9.1.2 晶体的特征	194
9.1.3 晶体的类型	195
9.1.4 非晶体	196
9.1.5 液晶	196
9.2 离子晶体	197
9.2.1 离子晶体的三种典型构型	197
9.2.2 离子的特征	197
9.2.3 离子的配位数和半径比规则	199
9.2.4 离子晶体的稳定性	200
9.2.5 离子极化	201
9.3 金属晶体	204
9.4 原子晶体和分子晶体	205
9.4.1 原子晶体	205
9.4.2 分子晶体	206
9.5 混合型晶体	206
9.5.1 链状结构晶体	206
9.5.2 层状结构晶体	207
9.6 实际晶体	207
习题	209

10 配位化学基础	211
10.1 配合物的基础知识	211
10.1.1 配合物的组成	211
10.1.2 配合物的命名	212
10.1.3 配合物的分类	213
10.2 配合物的空间异构现象	214
10.2.1 空间异构	214
10.2.2 结构异构	215
10.2.3 旋光异构	215
10.3 配离子的解离平衡	215
10.3.1 配离子解离平衡的表示方法	215
10.3.2 配离子解离平衡的移动	216
10.4 配离子的稳定性	219
10.4.1 中心离子对配合物稳定性的影响	219
10.4.2 配体性质对配合物稳定性的影响	220
10.4.3 中心离子与配体的相互作用对配离子稳定性的影响	220
10.5 配合物的化学键理论	220
10.5.1 配合物的价键理论	220
10.5.2 晶体场理论	223
10.6 非经典配合物简介	229
10.6.1 冠醚配合物	229
10.6.2 簇状配合物	230
习题	234
11 氢和稀有气体	237
11.1 氢	237
11.1.1 氢的发现和分布	237
11.1.2 氢的成键特征	238
11.1.3 H_2 的性质和用途	238
11.1.4 H_2 的制备	239
11.1.5 氢化物	240
11.2 稀有气体	242
11.2.1 稀有气体的发现	242
11.2.2 稀有气体的分布和分离	243
11.2.3 稀有气体的通性	243
11.2.4 稀有气体的用途	244
11.2.5 稀有气体的化合物	244
习题	247

12 碱金属和碱土金属	248
12.1 s 区元素概述	248
12.2 碱金属和碱土金属单质	249
12.2.1 物理性质	249
12.2.2 化学性质	250
12.2.3 制备方法	252
12.3 碱金属和碱土金属的化合物	253
12.3.1 氧化物	253
12.3.2 氢氧化物	256
12.3.3 氢化物	257
12.3.4 盐类	258
12.3.5 几种重要的盐	260
12.4 对角线规则	262
12.4.1 锂与镁的相似性	262
12.4.2 铍与铝的相似性	262
习题	263
13 硼族、碳族和氮族元素	266
13.1 硼族元素	266
13.1.1 硼族元素的发现和存在	266
13.1.2 硼族元素的性质	266
13.1.3 硼及其化合物	267
13.1.4 铝及其化合物	270
13.1.5 镓、铟、铊及其化合物	274
13.2 碳族元素	274
13.2.1 碳族元素发现和存在	274
13.2.2 碳族元素的性质	275
13.2.3 碳及其化合物	275
13.2.4 硅及其化合物	279
13.2.5 锗、锡、铅及其化合物	282
13.3 氮族元素	285
13.3.1 氮族元素的发现和存在	285
13.3.2 氮族元素的性质	286
13.3.3 氮及其化合物	287
13.3.4 磷及其化合物	294
13.3.5 砷、锑、铋及其化合物	299
习题	304

14 氧族元素和卤素	307
14.1 氧族元素	307
14.1.1 氧族元素的发现和存在	307
14.1.2 氧族元素的性质	308
14.1.3 氧及其化合物	308
14.1.4 硫及其化合物	315
14.1.5 硒和碲及其化合物	324
14.2 卤族元素	325
14.2.1 卤素的发现和存在	325
14.2.2 卤素的通性	326
14.2.3 卤素单质	327
14.2.4 卤化氢和氢卤酸	331
14.2.5 卤化物	333
14.2.6 卤素的含氧酸及其盐	335
习题	340
15 过渡元素	342
15.1 过渡元素通性	342
15.1.1 原子半径	342
15.1.2 物理性质	343
15.1.3 化学性质	344
15.1.4 氧化态	345
15.1.5 离子的颜色	346
15.2 钪及其化合物	346
15.3 钛、锆及其化合物	347
15.3.1 单质的性质和用途	347
15.3.2 钛的化合物	349
15.3.3 锆、铪及其化合物	350
15.4 钒及其化合物	352
15.4.1 单质的性质和用途	352
15.4.2 钒的化合物	353
15.5 铬及其化合物	356
15.5.1 单质的性质和用途	356
15.5.2 铬的化合物	357
15.5.3 钼和钨化合物	360
15.6 锰及其化合物	363
15.6.1 锰族元素概述	363
15.6.2 锰的化合物	364

15.7 铁、钴、镍	366
15.7.1 铁系元素的基本性质	366
15.7.2 铁、钴、镍的氧化物和氢氧化物	367
15.7.3 铁、钴、镍的盐	368
15.7.4 铁、钴、镍的配合物	371
15.8 铜族元素	374
15.8.1 铜族元素的通性	374
15.8.2 铜族元素的单质	375
15.8.3 铜族元素的主要化合物	377
15.8.4 IB 族与 IA 族元素性质的对比	384
15.9 锌族元素	385
15.9.1 锌族元素概述	385
15.9.2 锌族元素的金属单质	386
15.9.3 锌族元素的主要化合物	388
15.9.4 锌族元素与碱土金属的对比	391
15.10 铂系金属	392
15.10.1 单质的性质和用途	392
15.10.2 铂系金属化合物	392
15.10.3 铂系金属配合物	393
习题	396
16 镧系与铜系金属	399
16.1 镧系元素	399
16.1.1 镧系元素通性	399
16.1.2 镧系元素的提取和分离	403
16.1.3 镧系元素的重要化合物	404
16.2 铜系元素	407
16.2.1 铜系元素的通性	407
16.2.2 钍及其化合物	409
16.2.3 铀及其化合物	410
习题	413
17 生物无机化学	414
17.1 生物体中的元素	414
17.1.1 生命元素	414
17.1.2 生命元素的选择	415
17.1.3 生命元素的存在形式	415
17.1.4 污染元素	416
17.1.5 医用元素	416

17.2 生物配体	417
17.2.1 氨基酸	417
17.2.2 蛋白质	418
17.2.3 核酸	419
17.3 生命元素的生理功能	420
17.3.1 宏量元素的生理功能	420
17.3.2 微量元素的生理功能	422
17.4 地方病	425
习题	426
18 化学信息	427
18.1 国际化学学术组织	427
18.2 化学文献检索	428
18.3 电子期刊	431
18.4 化学数据库	433
18.5 专利数据库	434
习题	436
附 录	437
附表 I 一些物质在 298.15K 时的 $\Delta_f H_m^\ominus$, $\Delta_f G_m^\ominus$, $S_m^\ominus$	437
附表 II 弱酸、弱碱的解离常数 (298.15K)	443
附表 III 溶度积常数 (298.15K)	444
附表 IV 标准电极电势 (298.15K)	446
附表 V 一些配离子的标准稳定常数 (298.15K)	449
附表 VI 一些物质的标准燃烧热 (298.15K, 100kPa)	450
附表 VII 元素周期表	452
参考文献	453