



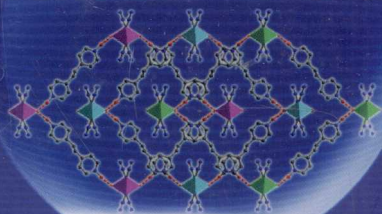
中国化学科学丛书

无机化学学科前沿与展望

国家自然科学基金委员会化学科学部 组编

陈 荣 高 松 主编

INORGANIC CHEMISTRY



科学出版社

中国化学科学丛书

无机化学学科前沿与展望

国家自然科学基金委员会化学科学部 组编

陈 荣 高 松 主编



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为国家自然科学基金委员会组织编写的《中国化学科学丛书》系列之一,由我国无机化学领域的一线专家和学科带头人合作编撰而成,介绍无机化学各个领域最近几年的主要研究前沿与进展,尤其注重分析目前研究中存在的问题,并提出今后 5~10 年的重点发展方向,以期对我国无机化学领域的科研工作者起一定的指导作用,对无机化学学科的发展起积极的推动作用。全书共 12 章,包括绪论、丰产元素化学、无机合成化学、无机固体化学、无机材料化学、配位化学、有机金属化学、团簇化学、生物无机化学、物理与理论无机化学、无机纳米化学、核化学与放射化学。

本书可供无机化学、化工以及材料、能源、医药等交叉学科领域的科研人员、高年级本科生、研究生和管理人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

无机化学学科前沿与展望/国家自然科学基金委员会化学科学部组编;陈荣,高松主编. —北京:科学出版社,2012
(中国化学科学丛书)

ISBN 978-7-03-034185-3

I. 无… II. ①国… ②陈… ③高… III. 无机化学 IV. O61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 082616 号

责任编辑:周巧龙 杨 震 韩 赞 / 责任校对:刘小梅 宋玲玲 林青梅
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 5 月第一次印刷 印张:63 1/2

字数:1 504 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《中国化学科学丛书》
编委会

顾 问 (按姓名汉语拼音排序)

白春礼	柴之芳	程津培	何鸣元
李静海	林国强	王 夔	徐光宪
杨玉良	姚建年	张存浩	张礼和
张玉奎	周其凤	朱道本	

主 任 梁文平

委 员 (按姓名汉语拼音排序)

陈 荣	陈洪渊	陈拥军	董建华
杜灿屏	段 雪	高 松	高飞雪
江桂斌	蒋华良	梁文平	林国强
麻生明	孙宏伟	田中群	王春霞
王利祥	杨俊林	杨振军	张 希
张国俊	朱利中	庄乾坤	

《中国化学科学丛书》总目

- 第一卷 无机化学学科前沿与展望
- 第二卷 有机化学学科前沿与展望
- 第三卷 物理化学学科前沿与展望
- 第四卷 高分子科学学科前沿与展望
- 第五卷 分析化学学科前沿与展望
- 第六卷 化学工程学科前沿与展望
- 第七卷 环境化学学科前沿与展望
- 第八卷 化学生物学学科前沿与展望

无机化学咨询组成员(按姓名汉语拼音排序)

柴之芳 陈小明 冯守华 高 松
洪茂椿 黄春辉 计亮年 江 雷
黎乐民 刘元方 倪嘉缙 钱逸泰
苏 锵 王 夔 徐光宪 徐如人
游效曾 郑兰荪

有机化学咨询组成员(按姓名汉语拼音排序)

陈庆云 程津培 戴立信 黄志镗
蒋锡夔 李正名 林国强 陆熙炎
麻生明 宋礼成 佟振合 涂永强
吴云东 张礼和 赵玉芬 周其林
朱道本

物理化学咨询组成员(按姓名汉语拼音排序)

白春礼 包信和 蔡启瑞 陈 懿
陈凯先 付贤智 何国钟 何鸣元
侯建国 江 龙 江元生 黎乐民
李 灿 梁敬魁 林励吾 刘若庄
闵恩泽 彭少逸 沙国河 孙家钟
唐有祺 田昭武 田中群 万惠霖
万立骏 吴新涛 姚建年 查全性
张存浩 张乾二 赵东元 朱起鹤
朱清时

高分子科学咨询组成员(按姓名汉语拼音排序)

曹 镛 程镕时 黄志镗 江 明
沈家骢 沈之荃 唐本忠 王佛松
吴 奇 徐 僖 颜德岳 杨玉良
张 希 周其凤 卓仁禧

分析化学咨询组成员(按姓名汉语拼音排序)

柴之芳 陈洪渊 董绍俊 黄本立
江桂斌 汪尔康 姚守拙 叶朝辉
俞汝勤 张玉奎

化学工程咨询组成员(按姓名汉语拼音排序)

陈丙珍 陈家镛 段 雪 费维扬
郭慕孙 何鸣元 胡 英 金 涌
李洪钟 李静海 闵恩泽 欧阳平凯
沈寅初 王静康 魏可镁 谢克昌
徐南平 袁 权 袁渭康 张 懿

环境化学咨询组成员(按姓名汉语拼音排序)

傅家谟 郝吉明 江桂斌 曲久辉
孙铁珩 汤鸿霄 唐孝炎 王文兴
魏复盛

化学生物学咨询组成员(按姓名汉语拼音排序)

陈洪渊 陈凯先 计亮年 林国强
倪嘉缵 王 夔 张礼和 张玉奎
赵玉芬

《中国化学科学丛书》序

跨入 21 世纪的十年,全球政治、经济、科技格局发生了巨大变化,中国在成为名副其实的经济大国的同时,也成为科学技术研究的大国。随着中国对科学技术和基础研究投入的不断加大,随着人类对物质世界认识的不断深化,化学学科迎来了新的发展机遇。

国家自然科学基金委员会化学科学部为了全面贯彻国家科技发展中长期规划,落实科教兴国和自主创新战略,组织化学化工领域广大专家对化学科学学科的战略地位、发展规律和特点、近年来学科发展现状与研究动态、未来 5~10 年各分支学科领域的发展布局与优先领域及重要发展方向、国际合作以及保障措施等展开了深入细致的战略调研,通过几十次不同规模的研讨会,历时两年多形成了化学学科发展战略研究报告和各分支学科的学科发展战略报告。在此基础上,组织编写了《中国化学科学丛书》。

丛书包括八卷,分别为《无机化学学科前沿与展望》、《有机化学学科前沿与展望》、《物理化学学科前沿与展望》、《高分子科学学科前沿与展望》、《分析化学学科前沿与展望》、《化学工程学科前沿与展望》、《环境化学学科前沿与展望》、《化学生物学学科前沿与展望》。

目前,全国科技界正在制定“十二五”学科发展战略与优先发展领域。我们希望能通过本丛书的出版,把科学家对化学学科及其分支学科发展调研成果提供给广大化学工作者作为参考。在丛书的编写过程中,国家自然科学基金委员会化学科学部专家咨询委员以及我国化学、化工界的科研人员对丛书的内容和相关材料曾做过多次研讨,提出了许多宝贵的建议和修改意见,在此向他们表示衷心感谢。高松院士、麻生明院士、田中群院士、张希院士和王利祥研究员、陈洪渊院士、段雪院士、江桂斌院士和朱利中教授以及蒋华良研究员分别作为无机化学、有机化学、物理化学、高分子科学、分析化学、化学工程、环境化学和化学生物学前沿与展望分册的主编科学家,对各自负责的分册付出了大量的辛勤劳动来组织编写工作,化学科学部各学科主任、项目主任及全体工作人员也为丛书的出版做出了巨大努力,在此一并表示感谢。

梁文平
2011 年 1 月

前 言

2011 年诺贝尔化学奖授予以色列材料科学家丹·谢赫特曼(Dan Shechtman),以表彰他“对准晶体(quasicrystals)的发现”。1982 年 4 月 8 日,舍特曼在快速冷却的铝锰合金中发现一种新形态的二十面体相(icosahedral phase)分子结构,开辟了研究准晶体的全新领域。为什么授予的是诺贝尔化学奖而非诺贝尔物理学奖? 2011 年 10 月中旬,在访问瑞典斯德哥尔摩大学化学系时,我曾和该系的老师们谈论这个问题。其实,从化学的定义,也容易理解。化学是从分子层次上研究物质的组成、结构、性质与转化的一门科学,原子如何构成物质这是核心的化学问题之一,而准晶的发现,揭示了一种新的原子间连接构造新物质的方式,自然应该授予诺贝尔化学奖。那么,这一奖项和无机化学有什么关系呢? 这可以追溯到化学的古代起源、冶金兴起和化学的近代发展,从青铜器到铁器,再到现代的各种金属与合金的冶炼和制造。周期表中,金属元素占据了大半壁江山,而金属、合金、金属间化合物,以及各种含金属的化合物,一直就是无机化学研究的主要对象。其实,无机化学的疆域,不仅包括金属及其化合物,还包括除碳氢化合物以外的所有单质与化合物。

2011 年是联合国确定的“国际化学年”(International Year of Chemistry),为了纪念化学科学所取得的成就以及对于人类文明的贡献,也为了纪念居里夫人获得诺贝尔化学奖 100 周年,纪念国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)的前身国际化学会联盟(IACS)成立 100 周年。我们简要回顾一下,一百多年来与无机化学相关的一些诺贝尔化学奖的工作,或许对于我们总结我们国家近些年来无机化学研究的进展,展望未来的发展有一些启示。

1904 年,威廉·拉姆齐爵士(Sir William Ramsay),发现了空气中的惰性气体元素,并确定了它们在元素周期表中的位置;1906 年,亨利·莫瓦桑(Henri Moissan),研究并分离了氟元素;1908 年,欧内斯特·卢瑟福(Ernest Rutherford),发现了放射性的半衰期,发现并命名了 α 射线和 β 射线;1911 年,玛丽亚·居里(Marie Curie),发现了镭和钋,提纯并研究了镭的性质;1913 年,阿尔弗雷德·维尔纳(Alfred Werner),提出了过渡金属配合物八面体构型;1914 年,西奥多·威廉·理查兹(Theodore William Richards),精确测量了大量元素的原子质量;1921 年,弗雷德里克·索迪(Frederick Soddy),对放射性物质以及同位素进行了研究;1922 年,弗朗西斯·威廉·阿斯顿(Francis William Aston)借助其发明的质谱仪发现了大量非放射性元素的同位素,并阐明了整数法则;1934 年,哈罗德·克莱顿·尤里(Harold Clayton Urey),发现了氢的同位素氘;1935 年,让·弗雷德里克·约里奥-居里(Jean Frédéric Joliot-Curie)与伊雷娜·约里奥-居里(Irène Joliot-Curie),发现了稳定的人工放射性;1943 年,乔治·查尔斯·德海韦西(György Charles de Hevesy),在化学过程研究中使用同位素作为示踪物;1944 年,奥托·哈恩(Otto Hahn),发现重核的裂变;1951 年,埃德温·马蒂森·麦克米伦(Edwin Mattison McMillan)和格伦·西奥多·西博格(Glenn Theodore Seaborg),发现了超铀元素;1960 年,威拉德·弗

兰克·利比(Willard Frank Libby),发展了使用 ^{14}C 同位素进行年代测定的方法;1973年,恩斯特·奥托·菲舍尔(Ernst Otto Fischer)与杰弗里·威尔金森爵士(Sir Geoffrey Wilkinson),对金属有机化合物进行了研究;1976年,威廉·纳恩·利普斯科姆(William Nunn Lipscomb),对硼烷结构进行了研究;1983年,亨利·陶布(Henry Taube),对金属配位化合物电子转移机理进行了研究;1996年,罗伯特·弗洛伊德·柯尔(Robert Floyd Curl)与哈罗德·克罗托(Walter Krotto)、理查德·斯莫利(Richard Smalley),发现了富勒烯;2011年,丹·谢赫特曼,发现了准晶。

此外,1987年获奖的超分子化学、2001年的手性催化、2005年的烯烃复分解反应、2010年的钯催化交叉偶联反应等,也都与金属离子的识别和参与的配位催化有关。像金属蛋白结构、离子通道等工作,也与无机化学密切相关。

不难看出,100多年来,无机化学的研究重心也在逐渐发生变化,从前50年发现新元素、研究与运用放射性和创造新的元素,到发现元素(B, C)和化合物(配合物、金属有机化合物、准晶等)新的成键或新的结构形式,再到金属参与的各种反应及其机理的研究。

《无机化学学科前沿与展望》是国家自然科学基金委员会化学科学部组织编写的《中国化学科学丛书》系列中的一本,是国家自然科学基金委员会开展“‘十二五’发展战略规划”研究,邀请无机化学学科相关专家进行调查研讨的总结。全书共12章,包括绪论、丰产元素化学、无机合成化学、无机固体化学、无机材料化学、配位化学、有机金属化学、团簇化学、生物无机化学、物理与理论无机化学、无机纳米化学、核化学与放射化学。

本书的绪论,归纳总结了目前国际上无机化学学科的发展趋势:无机化学与其他学科的交叉与融合进一步加强;无机化学的理论与实验研究更趋紧密结合,更加注重多尺度效应;无机化学的非常规合成方法发展加速;基于无机化学的过程工程加速向应用转化。同时,作者还分析了我国无机化学的发展现状,提出了今后一个时期我国无机化学的发展布局 and 优先发展领域。书中的其他各个章节,重点概述了我国学者在无机化学各分支领域近几年的主要研究前沿与进展,尤其注重分析存在的问题,提出今后的发展方向。我们期望,该书的出版,能够对我国无机化学的发展起到一定的指导作用。

从本书的丰富内容可以看出,无机化学这个在国内曾经的小学科,经过几代无机化学学者的不懈努力,近些年有了非常迅猛的发展,一些研究成果在国际上产生了重要的影响。同时,我们也应该清醒地看到目前存在的一些问题和今后需要努力的方向。为了促进和保障我国无机化学可持续地科学发展,我们需要积极倡导开展原创性工作,进一步加强人才队伍建设,不断完善科研评价体系,优化无机化学学科布局,加强无机化学学科与其他学科的交叉,使无机化学在能源、材料、健康等推动社会进步与发展的领域中发挥更重要的作用。

本书的编写,基于自2009年启动的“‘十二五’发展战略规划”研究。2010年开始每章的编写,分别约请了1~2位各个领域活跃在一线的专家学者负责各章的联系、组织和统稿,实际上参与编写的专家学者超过50人。在此,衷心感谢各章联系人和所有作者的辛勤劳动和宝贵贡献。

陈 荣 高 松

2012年2月

目 录

《中国化学科学丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 无机化学学科的发展规律与发展态势	1
1.1.1 无机化学学科定义与内涵	1
1.1.2 无机化学学科的发展规律	1
1.1.3 无机化学学科的发展趋势	3
1.2 无机化学学科的发展现状	4
1.2.1 我国无机化学学科在国际上的地位	4
1.2.2 无机化学领域的优势学科、薄弱学科和交叉学科的发展状况	5
1.2.3 经费投入与平台建设情况	7
1.2.4 人才队伍情况	7
1.2.5 推动学科发展、促进人才培养、营造创新环境等方面的举措与存在的问题	7
1.3 无机化学学科的发展布局	10
1.3.1 指导思想	10
1.3.2 发展目标	10
1.3.3 发展策略	11
1.4 无机化学学科优先发展领域与重大交叉研究领域	13
1.4.1 无机化学学科遴选优先发展领域的基本原则	13
1.4.2 无机化学学科“十二五”期间的优先发展领域	14
第 2 章 丰产元素化学	31
2.1 稀土功能材料及轻质高强结构材料的设计与制备	31
2.1.1 稀土发光材料	31
2.1.2 稀土功能材料的设计与制备	33
2.1.3 稀土基催化材料	37
2.1.4 稀土高分子复合材料研究进展	43
2.2 稀土绿色分离理论和工艺研究	45
2.3 多酸(多金属氧簇)化合物的合成、组装与功能化	46
2.3.1 基于多酸建筑块晶体工程学的合成方法和合成策略研究	46
2.3.2 多酸有机修饰化学的研究	52
2.3.3 多酸的功能化	55
2.4 盐湖镁、锂资源的利用	59
2.4.1 盐湖镁、锂资源利用的研究进展	59

2.4.2 盐湖镁、锂资源利用存在的问题	64
2.4.3 盐湖镁、锂资源利用的发展方向	65
参考文献	66
第3章 无机合成化学	80
3.1 无机合成新方法、新路线、新技术	80
3.1.1 无机高通量组合化学合成	81
3.1.2 绿色合成	82
3.1.3 极端条件下或外场(光、磁场)诱导下的无机合成	84
3.1.4 非水溶剂体系和反应离子热合成	86
3.1.5 无机光化学和电化学合成	87
3.2 无机自组装合成	89
3.2.1 自组装合成介孔材料	90
3.2.2 自组装合成新型微孔材料	92
3.2.3 基于自组装策略的功能 MOFs 材料的合成	93
3.2.4 自组装合成策略在功能纳米材料中的应用	94
3.2.5 挥发诱导自组装合成方法	97
3.2.6 外场下的自组装合成	98
3.2.7 以功能为导向的无机-有机复合材料自组装合成	100
3.2.8 关于自组装无机合成的总结和展望	100
3.3 无机功能材料的定向合成、制备与组装	102
3.3.1 引言	102
3.3.2 无机功能材料的结构设计	104
3.3.3 无机功能材料的定向合成	108
3.3.4 无机功能材料的可控制备	110
3.3.5 无机功能材料的组装	116
3.3.6 存在的科学问题	121
3.4 复杂无机体系反应过程与机制	122
3.4.1 相变及多晶转变	123
3.4.2 模板效应	125
3.4.3 合成反应的机理研究	127
3.4.4 展望	130
3.5 仿生合成特殊浸润性无机材料	130
3.5.1 引言	130
3.5.2 自然材料超疏水机理的揭示	133
3.5.3 仿生合成超疏水无机材料	136
3.5.4 仿生合成超双疏无机材料	138
3.5.5 仿生合成超疏水-超亲油无机材料	139
3.5.6 仿生合成超疏水-超亲水智能响应无机材料	139

3.5.7 科学问题	140
3.6 无机合成中柔性配体的构型控制及性能研究	141
3.6.1 柔性配体构筑的配位聚合物的结构特点	141
3.6.2 影响柔性配体的配位聚合物结构的因素	146
3.6.3 柔性配体构筑的配位聚合物的性能多样性	150
3.6.4 展望	153
参考文献	153
第4章 无机固体化学	171
4.1 无机固体合成化学:尝试、探索与设计	171
4.1.1 新型锗酸盐的合成与结构化学特点	172
4.1.2 三方层状钙钛矿——结构化学原理及应用	173
4.1.3 硼酸熔融法制备的系列新型硼酸盐的合成与结构	174
4.2 多功能无机化合物中的结构与性能关系	175
4.3 无机固体化学中的多尺度研究	184
4.3.1 介观晶体	184
4.3.2 微纳尺度内的固体及分级结构	187
4.3.3 原子与分子尺度的无机固体化学	190
4.4 固体表/界面的研究	192
4.4.1 界面材料的浸润性研究	192
4.4.2 热障涂层材料的界面性质研究	198
4.4.3 无机陶瓷膜的制备及表/界面性质研究	200
4.4.4 晶态薄膜的取向生长及性质	202
参考文献	203
第5章 无机材料化学	213
5.1 金属、氧化物结构敏感催化材料的设计合成	213
5.2 高效能源材料	214
5.2.1 锂离子电池材料	215
5.2.2 高容量储氢材料	220
5.2.3 燃料电池关键材料	222
5.2.4 太阳能电池关键材料	226
5.2.5 热电材料	228
5.3 非线性光学晶体材料	231
5.4 分子筛及多孔材料	236
5.4.1 多孔碳材料	236
5.4.2 多孔半导体材料	239
5.4.3 多孔主客体材料	239
5.4.4 具有多级孔结构材料	241
5.4.5 其他多孔材料	242

5.5 稀土化合物功能材料	244
5.6 无机-有机杂化材料	247
5.7 先进碳材料	251
5.8 发展方向	254
5.8.1 金属、氧化物结构敏感催化材料的设计合成	254
5.8.2 高效能源材料	254
5.8.3 非线性光学晶体材料	256
5.8.4 分子筛及多孔材料	256
5.8.5 稀土化合物功能材料	256
5.8.6 无机-有机杂化材料	256
5.8.7 先进碳材料	257
参考文献	257
第6章 配位化学	271
6.1 配位化学中的新反应及方法学研究	271
6.1.1 溶剂(水)热条件下原位金属/配体反应	271
6.1.2 利用模板化学技术实现对配位化合物的可控组装	274
6.1.3 离子热合成	278
6.1.4 微波辅助合成	278
6.1.5 固相合成	278
6.2 晶体工程研究进展	279
6.2.1 引言	279
6.2.2 无机-有机杂化晶体工程进展	279
6.2.3 无机晶体工程研究进展	281
6.2.4 有机晶体工程研究进展	281
6.3 配位超分子与分子工程学	282
6.3.1 分子工程策略	283
6.3.2 配位超分子类型	284
6.3.3 分子工程应用	288
6.4 多孔配位聚合物的设计和合成	289
6.4.1 多孔配位聚合物的结构设计	289
6.4.2 多孔配位聚合物的结构-性质相关性	291
6.5 光电功能配合物	295
6.5.1 发光配合物	296
6.5.2 导电配合物	306
6.6 磁性配合物	308
6.6.1 单分子磁体和单链磁体	308
6.6.2 多维磁性体系	311
6.6.3 多功能分子材料	312

6.7 手性配合物及分子聚集体的构筑、性能和构效关系	315
6.7.1 手性配体制备手性组装体	315
6.7.2 非手性配体制备手性组装体	318
6.8 三明治型四吡咯共轭大环类配合物	322
6.8.1 合成研究	323
6.8.2 晶体分子结构	326
6.8.3 通过光谱和电化学性质研究分子内 π - π 相互作用	328
6.8.4 在双层配合物中调节金属铈的价态	330
6.8.5 在双层配合物中孔穴和酸性质子所处的位置	330
6.8.6 超分子结构	330
6.8.7 有机场效应晶体管应用	331
6.9 存在问题与展望	332
6.9.1 新合成方法与新反应	332
6.9.2 晶体工程与分子工程	333
6.9.3 功能配位化合物	334
参考文献	335
第7章 有机金属化学	352
7.1 金属卡宾与卡拜配合物	352
7.1.1 引言	352
7.1.2 Fischer 卡宾、Schrock 卡宾和卡拜金属配合物	354
7.1.3 N-杂环卡宾金属配合物	361
7.1.4 总结与展望	374
7.2 不饱和有机金属化合物的合成、结构和反应性研究	374
7.2.1 不饱和有机金属化合物的制备、反应性及其应用	375
7.2.2 典型 $16e^-$ 不饱和有机金属化合物——半夹芯式含 $[E_2C_2B_{10}H_{10}]^{2-}$ 金属硫族碳硼烷类化合物	378
7.2.3 金属促进的碳硼烷衍生物的合成	389
7.2.4 前景与展望	392
7.3 小分子活化	392
7.3.1 金属配合物活化 CO_2	393
7.3.2 有机金属配合物催化一氧化碳(CO)还原偶合	399
7.3.3 有机金属配合物活化甲烷 C—H 键	402
7.3.4 有机金属配合物活化水分子的 H—OH 键	410
7.4 有机金属框架化合物的合成与结构	415
7.4.1 构筑策略	416
7.4.2 半夹心结构有机金属环状化合物	418
7.4.3 半夹心结构有机金属笼状化合物	425
7.4.4 半夹心结构有机金属化合物促进碳-氢键活化及其后反应研究	430

7.4.5 有机金属框架化合物的性能研究	432
7.5 金属簇合物化学	437
7.6 过渡金属催化的 C—H 键活化和脱羧反应:原子经济的合成路径	454
7.6.1 C—H 键的活化研究进展	454
7.6.2 脱羧反应研究进展	466
参考文献	475
第8章 团簇化学	506
8.1 富勒烯化学	506
8.1.1 富勒烯空笼	506
8.1.2 富勒烯包合物	513
8.1.3 富勒烯化学	533
8.2 多金属氧酸盐簇合物	555
8.2.1 缺位导向合成	555
8.2.2 协同导向合成	558
8.2.3 导向组装与设计合成	564
8.2.4 簇笼上的第二取代反应	568
8.2.5 基于多酸阴离子键连或模板的空旷骨架	572
8.2.6 多酸的有机功能化	575
8.2.7 现阶段多酸化学研究存在的问题与展望	578
8.3 后过渡金属氧簇合物化学	579
8.3.1 金属有机磷酸簇合物	579
8.3.2 羧基(醇胺)桥锰氧簇合物	587
8.3.3 其他后过渡金属氧簇合物	595
8.3.4 后过渡金属氧簇合物的组装	597
8.4 稀土-过渡金属簇合物化学	602
8.4.1 “金属配体”法合成稀土-过渡金属簇合物	603
8.4.2 阴离子模板法合成稀土-过渡金属簇合物	604
8.4.3 其他方法合成稀土-过渡金属簇合物	607
8.4.4 基于 3d-4f 簇合物为节点的配位聚合物组装	607
8.4.5 稀土-过渡金属异核氧基簇合物研究总结与展望	611
8.5 稀土簇合物	612
8.5.1 稀土簇合物的合成方法	613
8.5.2 羧酸类稀土簇合物	614
8.5.3 席夫碱衍生物类稀土簇合物	616
8.5.4 其他稀土簇合物	617
8.5.5 稀土簇合物为节点的配位聚合物	618
8.5.6 稀土簇合物研究总结与展望	619
8.6 主族元素氧簇化学	619

8.6.1 硼酸盐的模板合成	620
8.6.2 锗酸盐及硼锗酸盐的模板合成	623
8.6.3 锡氧簇的合成	626
8.6.4 金属有机锗酸盐的自聚合与诱导聚集	629
8.6.5 现阶段研究存在的问题与展望	631
参考文献	632
第9章 生物无机化学	656
9.1 重要金属酶的结构、功能、催化机理以及模型化合物构建	656
9.2 无机药物的设计、合成及其作用机制	661
9.2.1 抗肿瘤金属药物	661
9.2.2 抗糖尿病钒化合物	664
9.3 无机物与核酸的相互作用及功能调控的机制	667
9.3.1 金属化合物对人类端粒 DNA 的识别	667
9.3.2 稀土氨基酸配合物与核酸间的相互作用	672
9.3.3 碳纳米管与 DNA 的相互作用	676
9.3.4 铜锌超氧化物歧化酶及其模型化合物与 DNA 的相互作用	681
9.4 生物矿化	683
9.4.1 结晶调控及模拟	684
9.4.2 生物程序化组装及模拟	691
9.4.3 生物医学相关研究	694
9.4.4 生物启迪材料及仿生矿化	696
9.5 用金属组和金属蛋白质组学方法研究疾病相关的细胞金属代谢和稳态	697
9.5.1 金属组学研究中常用的方法	698
9.5.2 一些与健康相关的金属/准金属蛋白的研究	703
9.5.3 金属/类金属药物的临床应用	704
9.5.4 展望	706
9.6 稀土生物效应及其作用机制	706
9.6.1 稀土的活性物种	706
9.6.2 稀土的体内转运机制	707
9.6.3 稀土与一些重要蛋白质分子的作用	707
9.6.4 稀土促进细胞增殖和存活的分子机制	709
9.6.5 稀土毒性的分子机制	711
参考文献	712
第10章 物理与理论无机化学	734
10.1 理论方法在无机化学中的应用	734
10.1.1 化学键方法在无机材料中的应用	734
10.1.2 多金属氧酸盐结构化学规律性的理论探索	739
10.1.3 DFT 和 MD 方法在金属修饰纳米材料储氢研究中的应用	747