

无机化学中“配位化学基础”教学内容的重构探讨

翟全国*, 张鹏, 袁文玉, 王颖, 李淑妮, 胡满成, 高胜利*

陕西师范大学化学化工学院, 西安 710119

摘要: 一流的教学内容要求达到“知识-能力-素质有机融合”。“配位化学基础”教学内容作为无机化学理论基础之一的主章节, 应在教育部提倡的“专业-能力-素质有机融合”育人精神指导下, 突破长期存在的固化框架, 构建新的课程设计, 加强基础概念的科学性和准确性, 培养学生学以致用能力, 提高学生的科学素养, 体现“高阶性、创新性和挑战度”。提议将章名改为“配位化合物基础及应用”, 内容扩充描绘为6个模块; 尽量使教学内容的重构在保证基本知识面知识结构的前提下与时俱进, 适当凸显配位化学发展中的最新理论、最新研究成果、最新前沿、实践成果; 同时凸显“专业与思政同向同行”, 充分发挥课程育人功能, 从专业、能力、素质全方位促进学生学业发展。

关键词: 配位化学基础; 内容结构重组; 课程设计; 课程思政; 学生发展

中图分类号: G64; O6

Reconstructing the “Fundamentals of Coordination Chemistry” in Inorganic Chemistry Course

Quanguo Zhai*, Peng Zhang, Wenyu Yuan, Ying Wang, Shu'ni Li, Mancheng Hu, Shengli Gao*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China.

Abstract: The top-notch teaching content requires the integration of “knowledge, ability, and quality”. As the main chapter of “Inorganic Chemistry”, the teaching content of “Fundamentals of Coordination Chemistry” should break through the long-standing rigid framework and build a new curriculum design that reflects the combination of “professionalism, ability, and quality”. A new curriculum design should be built to reflect the scientific and accurate fundamental concepts, the ability to apply knowledge, and the improvement of scientific literacy at a high level, innovation, and challenge. It is proposed to change the chapter title to “Fundamentals and Applications of Coordination Compounds” and expand the contents into 6 modules. The reconstruction of teaching content should keep pace with the times while ensuring the basic knowledge structure, highlighting the latest theories, research results, frontiers, and practical achievements in the development of coordination chemistry. At the same time, it should highlight the “alignment and joint development of professionalism and ideological education” and fully play the role of the course in nurturing people, promoting the students' academic development from all aspects of professionalism, ability, and quality.

Key Words: Coordination chemistry basics; Content structure reorganization; Curriculum design; Curriculum ideological and political education; Student development

基础无机化学中“配位化学基础”一章是很重要的内容, 它是无机化学发展最快的内容之一^[1], 已成为当代无机化学中非常热门的前沿领域学科^[2], 也是扩充和应用化学键理论知识并指导元素化

收稿: 2024-03-23; 录用: 2024-06-21; 网络发表: 2024-09-03

*通讯作者, Emails: zhaiqg@snnu.edu.cn (翟全国); gaoshengli729@126.com (高胜利)

基金资助: 教育部“西部高校化学专业(师范)虚拟教研室”建设经费; 陕西师范大学本科教育教学改革“揭榜挂帅”项目(24JBGS28)

学讲授的重点之一。然而,在我国基础无机化学教材^[3]中设置的“配位化学基础”内容体系形成的固定知识体系和课程设计一定程度脱离了当代的学科前沿,未能很好体现出应有的“高阶性、创新性和挑战度”^[4]。随着社会的进一步发展,大学需要培养的是综合素质较强和理论基础扎实的创新型人才。依据教育部提出“要把人才培养的质量和效果作为检验一切工作的根本标准”为宗旨^[5],我们对“配位化学基础”一章进行了内容重构的探索,提出一些建议、做出一些尝试,收效尚好。

1 重构“配位化学基础”教学内容的基本思想

1.1 重构“配位化学基础”教学内容的必要性

过往“配位化学基础”教学内容和课程设计存在的不足:

(1) 知识层面。① 课程内容构架较为固定、僵硬,易于造成教师满堂灌、学生跟着听的习惯,影响教与学的积极性和创新。② 内容的知识模块一定程度落后于学科的发展,在概念、定义的明晰扩充,知识系统性,研究进展,实际应用等模块都有欠缺。

(2) 能力培养。① 突出应用性不够。例如配位键与经典化学键的关联和应用,配位化合物的应用均不够突出和系统,体现不出所学知识与工业生产、社会经济发展的“学以致用”要求。② 能力培养一定程度停留在高中阶段的“证据推理与模型认知”维度^[6],落脚在提高认知能力、注意力和记忆力方面,无法达到当今大学教学的根本目的——培养学生的理解力、思考力和判断力以及激发创造能力,即“启智”。

(3) 素质培养。① 课堂设计的教育功能不够充分,促进学生哲学思想和批判性思维的应用和科学研究方法的建立不够突出。② 挖掘课程中思政教育元素,宣扬科学家精神相对较少,“专业与思政同向同行”理念体现不够深入^[7]!

1.2 重构“配位化学基础”教学内容的原则

依据教育部2018年以来的高等教育改革精神和政策,重构“配位化学基础”教学内容应贯穿以下几个原则:

(1) 立足把思想政治工作贯穿于教育教学全过程^[8]。突出立德树人是发展中国特色社会主义教育事业的核心所在,是培养德智体美全面发展的社会主义建设者和接班人的本质要求。

(2) 立足教育部高等学校化学类专业教学指导委员会制订的《化学类专业教学质量国家标准》^[9]和《化学类专业化学理论教学建议内容》^[10],加强并提高教学内容的基本面知识更新。

(3) 立足内容重组在“高阶性、创新性和挑战度”的落实^[4]。加强培养学生解决复杂问题的综合能力 and 高级思维,体现“高阶性”;科学地将学术研究方法、科技发展前沿成果、课程思政理念等精准引入课程设计,体现“创新性”;追求教学内容的实、深、厚和知识的高层次,保证“挑战度”。

2 重构“配位化学基础”教学内容的探索

根据以上分析,近些年我们在教学中对“配位化学基础”教学内容进行了重构探索。

2.1 凸显基本面知识的完整性和科学性

为了使教材内容逻辑结构清晰,将章名改为“配位化合物基础及应用”,进行了内容模块的完整性重组:把碎片化的知识和内容变得厚实、完整、系统。整个内容整合为6个模块。

2.1.1 第1模块为配位化学发展简史

着手于科学背景的叙述,让学生了解发展简史,对发展有个概况了解,进行学习思维引导,感知广泛的知识宽度能够随时间变化与时俱进。

(1) 基本概念和定义的明晰和发展。从经典的“维尔纳”型配合物^[11]到标志性成果蔡氏盐^[12,13]、二茂铁^[14,15]和二苯铬^[16]等系列非经典配合物相继被发现,再到齐格勒-纳塔^[17,18]金属烯烃催化剂、原子簇化合物^[19]、大环配合物^[20]等新型配合物被陆续合成,传统配合物概念被打破。随着配位聚合物和分子簇合物等超分子化合物的出现,配位化学的范围大大发扩展了^[21-27]。特别需要指出的是,我

国科学家、教育家戴安邦院士(1901–1999)、徐光宪院士(1920–2015)^[28]和罗勤慧(1934–2019)教授均在配合物国际纯粹与应用化学联合会(International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)新的定义方面给予了扩充和完善,细化了配位原子间的相互作用类型,体现了化学键的发展。

(2) 配位化学化学键理论的发展。配合物的化学键理论研究与配位化学的发展密切相关。明显的几个里程碑是:维尔纳(A. Werner, 1866–1919)配位理论^[11]和路易斯(G. N. Lewis, 1875–1946)电子理论^[29]否定了“副价”的意义;1923年,西奇维克(N. V. Sidgwick, 1873–1952)^[30]将路易斯的酸碱电子理论应用于配合物,首次提出“配位钴氨配合物共价键”的概念和有效原子序数(EAN)规则,并与吉莱斯皮(R. J. Gillespie, 1924–)和尼霍姆(S. R. Nyholm, 1917–1971)等提出了价层电子对互斥理论(VSEPR)^[31–36],价电子对之间斥力决定了分子的优选几何构型,但不能说明多元异构等非寻常的立体异构现象;鲍林(L. C. Pauling, 1901–1994)等人建立配合物的价键理论(valence bond theory, VBT)^[37],其中又有陶布(H. Taube, 1915–2005)^[38]提出的“所有配合物中的中心原子与配体间都是以配位键结合的,配合物可以有外轨型和内轨型之分”,和“反馈 π 键概念”的提出^[39–41];进入20世纪后,贝蒂(H. A. Bethe, 1906–2005)和范弗累克(J. H. van Vleck, 1899–1980)从静电场作用出发,将配体和金属间的作用看作是点电荷之间的静电作用,认为配体的存在引起了中心离子 d 轨道的分裂,从而提出了晶体场理论(Crystal Field Theory, CFT)^[42],在此基础上,提出了晶体场稳定化能等概念,并对配合物的立体结构、磁性、吸收光谱以及配合物在溶液中的稳定性进行了很好的解释;20世纪50年代,为了深入理解过渡金属配合物的光谱和磁性,需要更进一步考虑中心原子与配体之间的共价性质,因此,人们将晶体场理论和分子轨道理论(molecular orbital theory, MOT)结合,发展成为配体场理论(ligand field theory, LFT),这是比晶体场理论更接近配位键本质的理论。

(3) 配位化学未来发展展望。配位化学是无机化学中一门充满活力、极其重要的基础性分支学科,在化学基础理论和实际应用方面都有非常重要的意义和作用。配位化学与所有二级化学学科以及生命科学、材料科学、环境科学等一级学科都有紧密的联系和交叉渗透,这些交叉和渗透表现如下:与理论化学的交叉产生“理论配位化学”——配位场理论,配合物的分子轨道理论,配合物的分子力学、从头计算等。与物理化学的交叉产生“物理配位化学”,包括“结构配位化学”和“配合物的热力学和动力学”。在均相和固体表面的配位作用是催化科学的基础。

2.1.2 第2模块为配位化合物的基本概念

基本概念是基础课的基本面知识,但仍需扩充。除了准确介绍定义、组成和命名,着重于三方面的完善。(1) 增加“配位化合物的类型”,概括为经典与非经典配合物、单核与多核配合物和配位聚合物。(2) “异构”是指化学式相同但结构不同的现象,配合物的异构及由此产生的各种异构现象是研究和了解配合物性质和反应的重要基础。(3) 配位化合物的命名。增加了含特殊配体配合物的命名、几何异构体的命名和多核配合物的命名。

2.1.3 第3模块为配位化合物化学键理论的应用及电子光谱

本模块希望达到通过基础课提高学生科研素质的教学目的,是课程设计的难点部分。(1) 介绍并强调各种配位化合物化学键理论的应用及其相关概念,如价键理论中的配位数与配位构型、内轨型和外轨型配合物及其应用,晶体场理论中的 d 轨道的分裂、分裂能、高自旋与低自旋、稳定化能、1937年姜(H. A. Jahn, 1907–1979)和泰勒(E. Teller, 1908–2003)基于群论提出姜-泰勒效应^[43]及其应用,配体场理论中着重考虑分子对称性决定的共价成键的分子轨道,为许多实验结果给出了更合理的解释^[44]。(2) 介绍过渡金属配合物的电子光谱。配合物的电子光谱是研究配合物结构的利器,可以有效获得配合物准确的电子能级结构及分裂能等信息。例如从原子或离子中电子的光谱项引申到求出配合物中的电子光谱项。

2.1.4 第4模块为配位化合物的稳定性

定义配位化合物的稳定性,必须同时明确给出该化合物所处的具体环境和具体用途。配位化合物的稳定性泛指在水溶液、空气中,或者对热和光的稳定性等,通常包括它们在溶液中的热力学配

位稳定性、氧化还原稳定性和热稳定性等。(1) 讨论配位化合物的热力学稳定性、影响因素、稳定性大小的定量尺度、稳定常数/不稳定常数的描述及相关计算等。(2) 介绍配位化合物的动力学稳定性、反应类型、反应速率、影响速率的因素、反应机理等。(3) 关于固态配位化合物的热稳定性及其影响因素, 从配位键强度、配合物结构维度、结晶类型、配体稳定性等角度展开讨论。同时介绍配合物稳定性表征的基本手段, 如热分析技术(如热重分析TG-DTG、差示热分析DTA、差示扫描量热分析DSC等), 通过热分析曲线解析可获得配合物热稳定性信息, 包括热稳定温度区间和条件、热分解过程和机理以及热分解动力学信息等^[44-46]。

2.1.5 第5模块为配位聚合物概述

配位聚合物是由桥联配体和金属离子通过配位键形成的具有高度规整的无限网络结构的配合物。得益于结构的独特优势, 配位聚合物研究近二十年来发展迅速, 与晶体工程、超分子化学、材料科学及固态化学等诸多领域交叉渗透, 成为当前无机化学研究中最活跃的领域之一, 呈现出方兴未艾的发展趋势。因此, 我们设计了简介模块, 包括配位聚合物的发展历程、配位聚合物的分类、配位聚合物的拓扑网络、配位聚合物形成的影响因素、配位聚合物的合成方法、几类典型的配位聚合物, 如代表性的MOF-5系列(金属有机骨架材料发展史上的一个里程碑^[47,48])、MIL系列^[49,50]、ZIF系列^[51](图1)、PCN系列^[52,53]和UiO系列^[54]等, 它们都是先进功能材料。这是一个全新的知识模块。

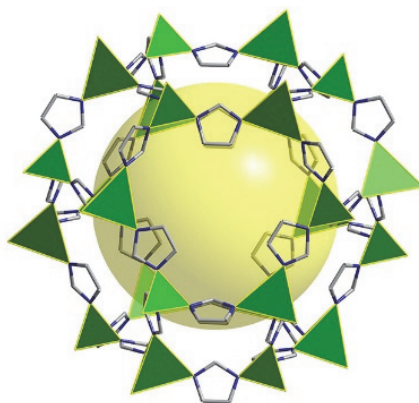


图1 ZIF-8的多孔结构

2.1.6 第6模块为配位化合物的应用简介

这也是一个全新的知识模块。(1) 配合物在无机化学及分析化学中(萃取分离、沉淀分离、离子交换分离、用作掩蔽剂、用作显色剂、指纹显现、文件检验)、在矿物中(成矿中的元素运移、矿物浮选)、在环境保护中(污染物吸附降解(图2)^[55]、重金属离子去除、核废料去除、污染物传感检测)、在催化反应中(钯催化的碳-碳偶联反应、催化氮分子还原、催化二氧化碳的化学转化(图3)^[56]、催化水分解反应)的应用。(2) 配位聚合物功能材料。包括生物功能配位聚合物(由核碱基、氨基酸、多肽合和由蛋白质合成的Bio-MOFs等)(图4)^[57]、吸附功能配位聚合物(图5)^[58,59]、发光功能配位聚合物、导电功能配位聚合物和磁性功能配位化合物。

2.2 凸显教学内容的“高阶性、创新性和挑战度”

凸显教学内容的“高阶性、创新性和挑战度”, 关键在于“细微之处”所引入的最新理论、最新研究成果、最新前沿和实践成果, 以及知识扩充的深度和宽度。当下围绕“配位化学基础”的科学研究取得了丰硕的成果, 这些成果涉及生命科学、材料科学、环境科学等, 形成了一些当前国际前沿交叉学科与热点研究领域。将与之相关的前沿交叉领域与新科研成果融入到“配位化学基础”的教学内容和课程设计中是很有必要的。我们在提倡“像搞科学研究那样搞教学研究”^[60]的理念下进行了探索, 力求达到“知识-能力-素质有机融合”的要求。下面以一些重点例证说明之。

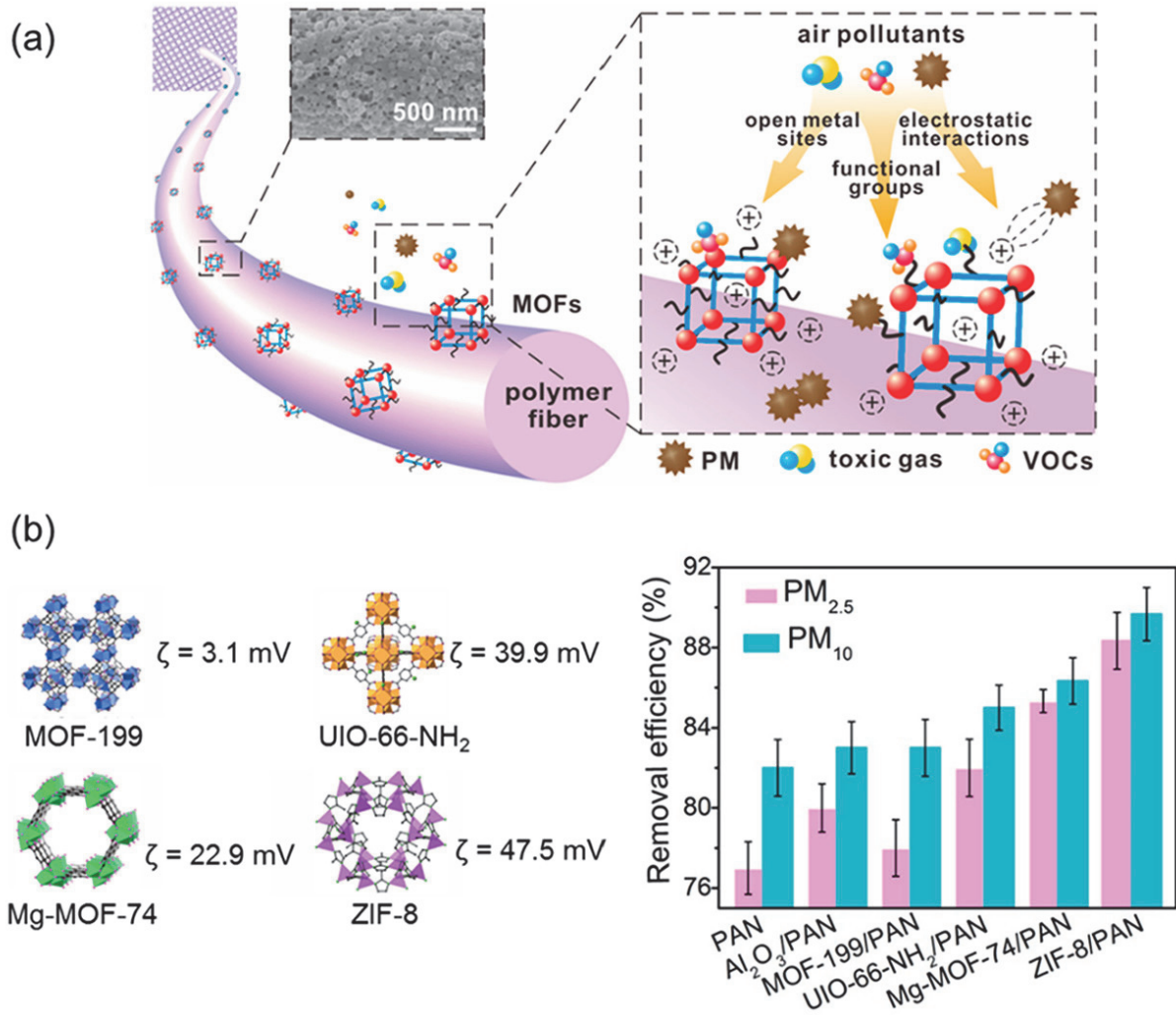


图2 (a) MOF过滤空气污染物的捕获机制示意图；(b) 四种不同MOFs在雾霾环境中的PM去除效率

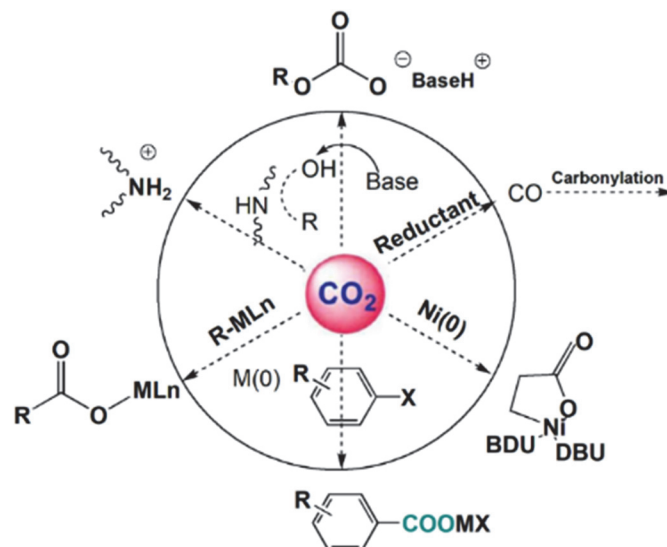


图3 CO₂的活化方式

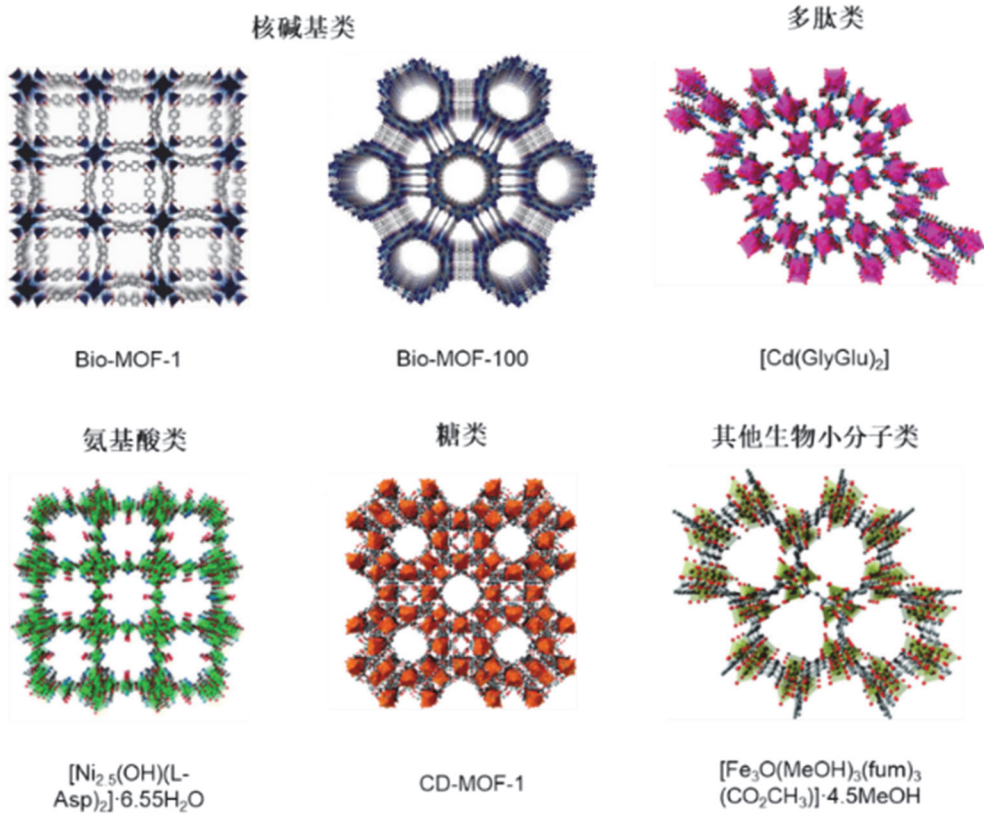


图4 Bio-MOFs的常见结构

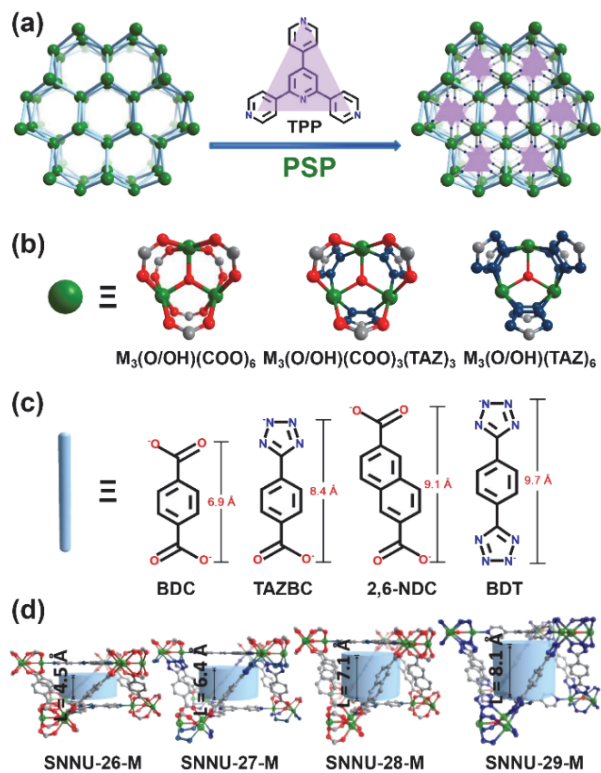


图5 *pac*s-MOFs材料平台

2.2.1 强调配位化学概念和定义的发展应加强教学内容与时俱进

通常的无机化学上册是理论部分内容，按主流教材^[3]的编排为：

- 第1章 化学基础知识
- 第2章 化学热力学基础
- 第3章 化学反应速率(更多的是化学反应动力学基础)
- 第4章 化学平衡(有些教材无此章)
- 第5章 原子结构和元素周期律
- 第6章 分子结构和共价键理论(有的为分子结构和化学键)
- 第7章 晶体结构
- 第8章 酸碱解离平衡
- 第9章 沉淀溶解平衡
- 第10章 氧化还原平衡
- 第11章 配位化学基础

上述各部分的概念和定义，不但与高中阶段学习差别较大，且其本身也在发展提高^[61-65]。这就必须从具体概念和定义的发展给予学生以准确讲授和提高。例如，氧化还原平衡中，关于“化合价-氧化数-形式电荷”概念的发展，在《氧化还原反应与电化学应用》^[66]一书中，作者从电荷与量化计算出发，由电子云密度分布图得到静电势图，才给了这一常见而易混肴的概念清晰的讲解。

配位化学概念和定义也存在类似问题。配位化学发展如此迅速，概念和定义自然更要进行诠释。2005年，IUPAC对配合物做了新的定义：“任何包含有配位实体的化合物都是配合物。配位实体可以是离子或者中性分子，配位实体中有中心体，通常为金属，中心体周围有序排列的原子或基团称为配体。”该定义强调配合物组成的两个要素(中心体和配体)，但未对中心体和配体之间的结合力做出描述。

徐光宪院士则将现代配合物定义为由广义配体与广义中心体结合形成的“配位分子片”，如单核配合物、多核配合物、簇合物、功能复合型配合物及其组装器件、超分子化合物、锁与钥匙复合物等，由此配合物的概念得以被扩展。罗勤慧教授在结合达里尔·H·布希(D. H. Busch, 1928-2021)关于“完整配位化学”概念基础上，进一步完善了配位化学的定义：“配位化合物是含有配位实体的化合物。配位实体可以是离子或者中性分子，是以无机、有机的阳离子、阴离子或中心分子作为中心，和有序排列在其周围的原子、分子或基团(配体)，通过多种相互作用(配位作用、氢键、离子-偶极、偶极-偶极、疏水作用、 π - π 相互作用等)，结合成具有明确结构的化合物。”

2.2.2 强调反馈 π 键概念应加强其在理论和应用方面的深层次意义

1951年Dewar应用分子轨道研究银(I)烯烃配合物时首先提出，后由J. Chatt和L. A. Duncanson在此基础上于1953年提出蔡斯盐结构模型(DCD模型)。DCD模型第一次提出了反馈 π 键的概念，成功地说明了蔡斯盐中中心离子铂(II)同配体乙烯之间的作用。当配位体给出电子对与中心元素形成 σ 键时，如果中心元素的某些 d 轨道(如 d_{xy} 、 d_{yz} 、 d_{xz})有孤电子对，而配位体有空的 p 分子轨道(如CO中有空的 p^* 轨道)或空的 p 或 d 轨道，而两者的对称性又匹配时，则中心元素的孤对 d 电子也可以反过来给予配位体形成所谓的“反馈键”^[39-41]。其实质是形成反馈键可在能量上表现为金属的晶体场分裂能增大，从而使得金属和配体的作用力更强。这一方可以解释类似于 $[\text{Ni}(\text{CO})_4]$ 配合物的稳定性(Ni-C键长为182 pm，而共价半径之和为198 pm^[67])，更重要的是可用于将具有很高的键解离能的小分子(CO_2 、 N_2 、 H_2O 和 H_2 中的C=O、 $\text{N}\equiv\text{N}$ 、O-H和H-H键键能分别为749、944.8、497.1和435.8 kJ·mol⁻¹)直接活化具有很大的意义^[68-71]，是它们转变为清洁燃料、农业肥料以及高附加值的化工产品，不但能缓解环境污染和能源短缺压力，也能给人类社会带来经济效益^[72]。

2.2.3 强调姜-泰勒效应是教学内容高阶性的体现

姜-泰勒效应是基于群论提出的：在对称的非线性分子中，简并轨道的不对称占据必然会导致分

子的几何构型发生畸变，结果是降低分子的对称性和轨道的简并度，使体系能量进一步降低从而达到更稳定状态。它的发生不是个别的，存在于许多构型晶体场中(表1)，而且不仅存在于配合物稳定基态构型中，对于更高能量的激发态能级同样存在此类效应(图6)。

表1 d^n 组态八面体配合物的姜-泰勒效应和实例

畸变类型	d 电子数	d 电子的分布	畸变情况	实例
强的畸变	d^9	$t_{2g}^6 d_{z^2}^2 d_{x^2-y^2}^1$	z 轴上键显著增长	$\text{CsCuCl}_3, \text{K}_2\text{CuCl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	d^7 (低自旋)	$t_{2g}^6 d_{z^2}^1 d_{x^2-y^2}^0$	z 轴上键显著增长	NaNiO_2
	d^4 (高自旋)	$t_{2g}^3 d_{z^2}^1 d_{x^2-y^2}^0$	z 轴上键显著增长	$\text{MnF}_6^{3-}, \text{CrF}_2$
弱的畸变	d^1	d_{xy}^1	$x、y$ 轴上键略增长	$[\text{Ti}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$
	d^2	$d_{xy}^1 d_{xz}^1$	$x、y$ 轴上键略增长	$[\text{Ti}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$
	d^4 (低自旋)	$d_{xy}^2 d_{xz}^1 d_{yz}^1$	z 轴上键略缩短	$[\text{Cr}(\text{CN})_6]^{3-}$
	d^5 (低自旋)	$d_{xy}^2 d_{xz}^2 d_{yz}^1$	yz 平面上键略缩短	$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$
	d^6 (高自旋)	$d_{xy}^2 d_{xz}^2 d_{yz}^1 e_g^2$	xy 平面上键略增长	$[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$
	d^7 (高自旋)	$d_{xy}^2 d_{xz}^2 d_{yz}^1 e_g^2$	yz 平面上键略缩短	$[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$

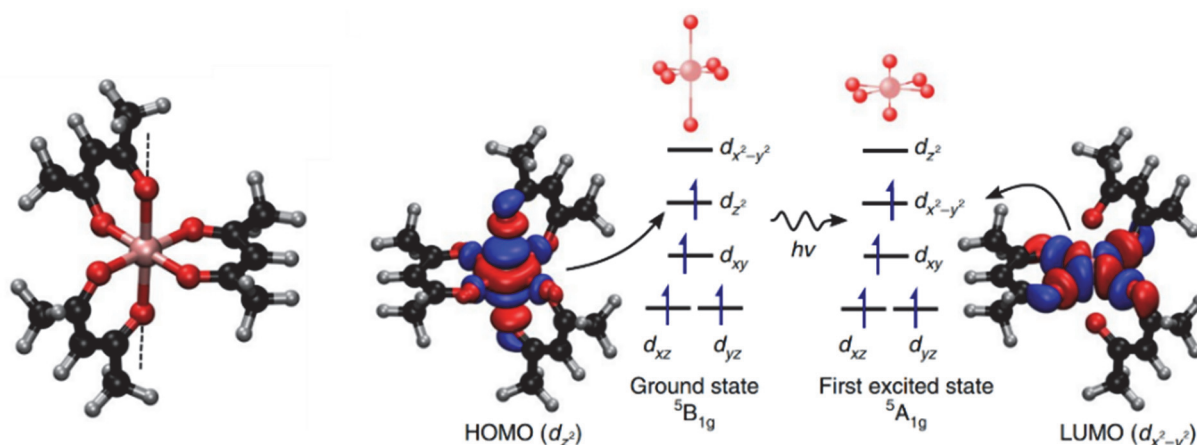


图6 Mn^{3+} 配合物($\text{Mn}(\text{acac})_3$ (左); acac = 乙酰丙酮配体)的分子结构(基态拉长八面体和激发态压扁八面体) (右)

2.2.4 强调配位化合物动力学稳定性有利于指导生产实践

从动力学角度介绍配位化合物的反应特征，一方面可了解从反应物到生成物过程中所发生的各步反应过程，概括反应过程中所服从的客观规律；另一方面研究反应所遵循的动力学方程和反应机理，以利于设计工艺和生产流程，把具有实用意义的化学反应最大效率地投入生产。从常见的五大类反应类型出发，介绍反应历程的完整组成和每一反应步骤的细节、可能的过渡态或中间体，反应过程所产生的新物种或转移方式等。配合物的氧化-还原反应就是电子转移反应，这是一类相当复杂的反应，该反应可发生在众多的体系中。例如，溶液或胶体中的有机化合物分子，不同界面的电子转移过程，以及生命体系的氧化还原反应过程等。电子转移反应的动力学与机理研究多年来一直受到化学家的极大重视，并已取得了很大的成就^[72-74]。人们普遍接受的两种机理为外球机理和内球机理。

2.3 凸显“学以致用”的能力培养

所谓教学的能力培养就是如何实现“学以致用”：① 理论知识的深入和高阶性，培养学生的理解力、思考力和判断力以及激发创造能力；② 提倡理论与应用的结合，扩展理论知识在相应交叉学

科中的应用和认知。我们在“细微之处”创新性地做了几件事情。

(1) 依据发展中的最新理论、最新研究成果、最新前沿、实践成果，增加了比较系统的“配位化合物的应用简介”和“配位聚合物功能材料”两个模块的基本知识内容。使得“配位化合物基础及应用”内容从课程设计框架上趋于完整。

(2) 各节内容的拓展，采用以实际应用或发展中的例证补充之，在概念上均采用“原先的说法—目前进展—未来的发展”的设计，是学生有理论基础是什么、发展是什么的探究思维。

① 对配位化学的概念和定义，不再是中学的讲法，而是戴安邦和罗勤慧大学的提法，对徐光宪前瞻性的说法“配位分子片”能否接受、如何理解，随着研究对象的扩充还会发展么？也就是学习的知识是“动态的、发展的”。

② “反馈 π 键概念与分子轨道能量”“姜-泰勒效应与群论”“配位化学与立体化学的关系”等都是配位化合物理论的拓展，保证学生理解的科学性。也是学科体系、学术体系和学科思维的提升。

③ “配位化合物的稳定性”从热力学因素和动力学因素，全面理解“配合平衡”的实质，不仅停留在中学“平衡常数”概念上，从而有利于生产实践中处理好复杂体系的平衡。

④ 配位化合物从“经典配合物”到“非经典化合物”，再到“单核与多核配合物”，再到“配位聚合物”，这样一种随客观实践的发展态势。

⑤ “配位化合物的应用简介”一般教材中体现相对较少，但恰好反映了“配位化学与所有二级化学学科以及生命科学、材料科学、环境科学等一级学科紧密联系和交叉渗透之实”。

(3) 就“学以致用”来讲，创新性地设计了“历史事件回顾”和“研究无机化学的物理方法介绍”栏目，用以延深课程设计地突出教育功能及科学方法，在各内容模块之后展示。

① 历史事件回顾：1. 我国配位化学的开拓者和奠基人-戴安邦。

② 历史事件回顾：2. 顺铂类抗癌药物。

③ 研究无机化学的物理方法介绍：1. 配位化学研究的基本方法简介。

④ 研究无机化学的物理方法介绍：2. 配位化合物稳定常数的测定。

⑤ 历史事件回顾：3. “孔”的故事——从沸石分子筛到金属-有机框架。

⑥ 研究无机化学的物理方法介绍：3. 配位聚合物 $[\text{Cu}_2\text{I}(\text{DETRZ})_n]$ 的制备与表征实例。

2.4 凸显“专业与思政同向同行”的素养培养

将课程思政融入“配位化合物基础及应用”知识结构体系，从家国情怀、民族自豪感、专业认同、科学精神、绿色化学和环保思想、能力培养等方面与课程知识有机结合，充分发挥课程育人功能，促进学生从专业、能力、素质全方位发展。这样才能做到课程设计突出“专业与思政同向同行”，避免专业与思政“两张皮”、贴标签^[75]，做到两者互融，高阶性地以完整的课程体系和知识体系全面落实思政育人目标。我们的做法是：

(1) 教师是实施课程思政建设的主体^[76]，教师要深度认识到课程思政不仅是育人，也是提高自己从业精神、自觉提高立德树人意识、深化对专业知识认识、提升思维能力的过程，通过教学研究、集体备课方式达到共识。

(2) 课程设计中要不断正确理解课程思政内涵^[77-80]，提升设计能力。我们围绕的几个内涵主题是：

① 爱国情怀第一。突出为什么学习的问题。

② 要明确意识到肩负的国家使命和社会责任。

③ 培养学生尊重科学、实事求是的科学作风。

④ 讲科学研究方法、思路，启发学生的创新意识。

(3) 针对性选择历史事件、科学背景，科学家的突出贡献，例如：弘扬戴安邦的教学科研精神；维尔纳与约根森之争显示的科学家风范^[81]；理清顺铂类抗癌药物的发展和作用(图7)^[82]引起的思考；

介绍我国在MOFs材料研究方面处于世界领先地位的四位中国科学院院士——中国科学院福建物质结构研究所的洪茂椿院士、中山大学的陈小明院士、北京大学的高松院士和南开大学的卜显和院士等。

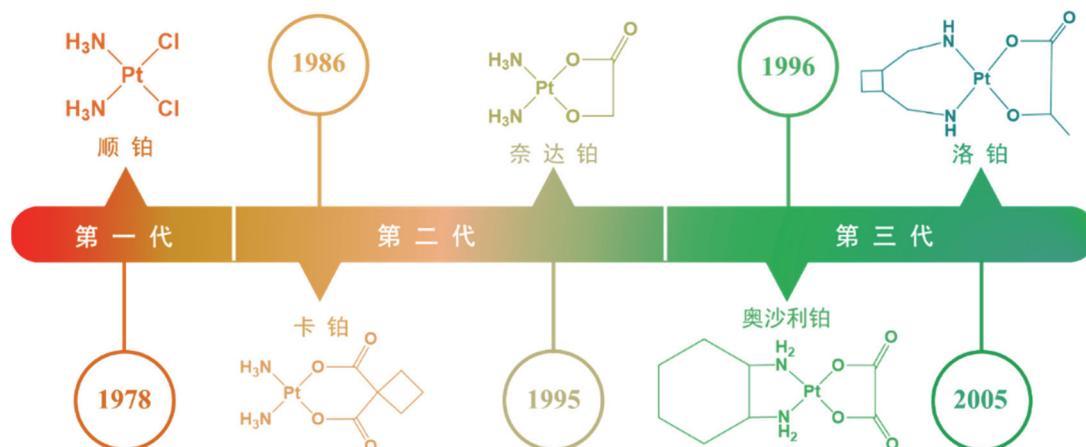


图7 铂类药物的发展与典型铂类药物的化学结构

2.5 建议的“配位化合物基础及应用”教学内容重构方案

基于系统的文献检索、梳理及综述工作，从各个化学研究领域的文献中找到能够体现配位化学新知识、新思想、新方法的内容，充分考虑学生的认识规律及知识的内在逻辑与联系，合理规划本章节内容体系，提出了建议的“配位化合物基础及应用”教学内容的重构方案(表2)。总体力求在保证基本面知识内容完整性的基础上，增加新原理、新应用、新成果介绍，突出在新型功能材料中的应用；增加贴近内容主线的“历史事件回顾”专题讲座，突出我国科学家的贡献。

3 结语

(1) 体现“知识-能力-素质有机融合”理念，“配位化学基础”教学内容的重构着重考虑“高阶性、创新性和挑战度”。建议中力争知识模块做到完整、系统、科学，内容做到实、深、厚，把最新研究成果引入教学内容，能力训练做到体现“知其然又知其所以然”“学以致用”；强调“启智”，突出培养学生解决复杂问题的综合能力和高级思维，强调科学素质养成、道德素质增长，强调具有哲学思想和批判性思维、懂得并会建立科学研究方法，具有科学家的献身精神，树立起社会主义的世界观、价值观、人生观。

表2 建议的“配位化合物基础及应用”教学内容重构方案

模块单元	内容及核心点	讲授设计策略	主要教法思路设计特点
1. 配位化学发展简史(1课时)	内容: 1.1 配位化学基本概念和定义的发展; 1.2 配位化学化学键理论的发展; 1.3 配位化学未来发展展望 核心点: 基本概念和定义的发展	整体内容在上课前发布, 学生预习; 授课过程以3条“发展”脉络为主线, 简明扼要讲解发展史实	1. 以“背景问题提示”引导学生带着问题学习; 2. 线上线下混合; 3. 依据课时安排张弛有度; 4. 精制表、图穿插, 利于科学解析和阐释及课件制作; 5. 提供充足的参考文献, 注重及时引入最新研究成果
	历史事件回顾: 1. 我国配位化学的开拓者和奠基人——戴安邦	专题讲座: 凸显科学研究和环保意识	凸显戴安邦先生的创业之路、学术思想、高尚的科学精神与品德; 一堂生动的思政课

(待续)

(续表2)

模块单元	内容及核心点	讲授设计策略	主要教法思路设计特点
2. 配位化合物的基本概念(1课时)	内容: 2.1 配位化合物的定义; 2.2 配位化合物的组成; 2.3 配位化合物的类型; 2.4 配位化合物的异构现象; 2.5 配位化合物的命名 核心点: 配位化合物的准确定义、组成、类型、异构	线下详讲; 以不同实例引入讨论, 明确概念; 以思考题和例题讲明异构产生原因及判断	例证解析-明确概念-思考题/例题讨论-明晰准确概念; 图解法动画使用有巧妙之处, 可明确异构体的分类与判断方法; 举例说明旋光异构现象与性质的关系、合成方法
	历史事件回顾: 2. 顺铂类抗癌药物	专题讲座: 展现顺铂类抗癌药物的发展	糅合专题讲座与学生科研沙龙, 增强价值(科学伦理、生态伦理、生命伦理)引领, 初探课程评价机制
3. 配位化合物化学键理论的应用及电子光谱(2课时+辅导课1课时)	内容: 3.1 配位化合物的价键理论; 3.2 配位化合物的晶体场理论; 3.3 配位化合物的配体场理论; 3.4 过渡金属配合物的电子光谱 核心点: 配位化合物的配体场理论; 配合物的电子光谱	线上预习、线下详讲; 在简述价键理论和晶体场理论的基础上, 强调从配体和中心离子两个角度解析“配位场理论”	以图解的方式理解“内轨型和外轨型”“ <i>d</i> 轨道的分裂”和“高自旋与低自旋”, 明白价键理论和配位场理论的本质, 继而理解配位场理论的本质
	研究无机化学的物理方法介绍: 1. 配位化学研究的基本方法简介	专题讲座: 展现顺铂类抗癌药物的发展	掌握配合物分子结构、电子结构和磁学性能的基本研究方法, 提高分析问题和解决问题的能力
4. 配位化合物的稳定性(1课时)	内容: 4.1 配位化合物的热力学稳定性; 4.2 配位化合物的动力学稳定性 核心点: 热力学稳定性与动力学稳定性的关系	以“反转课堂形式”, 边讲边议, 通过习题计算、提问、讨论, 多方面理解溶液中的配位平衡; 引出固态配合物的热分析方法介绍	多种教学方法, 让学生大脑动起来, 培养学生的理解力、思考力和判断力以及激发创造能力
	研究无机化学的物理方法介绍: 2. 配合物稳定常数的测定	结合实验讲解	从方法、概念的理解提高到解决复杂问题的能力训练
5. 配位聚合物概述(辅导课1课时)	5.1 配位聚合物概述; 5.2 配位聚合物的分类; 5.3 配位聚合物的拓扑网络; 5.4 配位聚合物形成的影响因素; 5.5 配位聚合物的合成方法; 5.6 几类典型的配位聚合物	线上提供阅读学习资料, 线下在教师科研小组进行参观、介绍, 线下以实例讲解概念	多种教学方法, 让学生大脑动起来, 培养学生的理解力、思考力和判断力以及激发创造能力, 为布置进行“课程小论文”做准备
	历史事件回顾: 2. “孔”的故事——从沸石分子筛到金属-有机框架	专题讲座: 展现配位聚合物的发展	多种教学方法, 通过基础课培养学生科研素质
6. 配位化合物的应用简介(辅导课1课时)	6.1 配合物在无机化学及分析化学中的应用; 6.2 配合物在矿物中的应用; 6.3 配合物在环境保护中的应用; 6.4 配合物在催化反应中的应用; 6.5 配位聚合物功能材料	线上提供阅读学习资料、文献、课题目录, 分组进行准备, 以“小论文报告”“反转课堂形式”形式进行, 教师点评	体现“知识-能力-素质有机融合”
	研究无机化学的物理方法介绍: 3. 配位聚合物[Cu ₂ (DETRZ)] _n 的制备与表征实例	线上提供阅读学习资料, 学生查阅相关资料; 线下参观“院大型仪器室”, 线上小结	综合练习, 提升文化素养(增长知识见识、培养奋斗精神、增强综合素养)

(2) 近二十多年来,我国纳米化学和配位化学的发展,带动了无机化学学科快速发展,大多数高校所教授的无机化学专业知识与学科发展的差距更显突出。本文所探索的,正是为了改变这一局面。课程设计是按现行6课时安排,是否合适,各校各人要以实际情况而定。不过要注意的是:①无机化学的课程设计已经到了必须改革的时候了。②多种教学形式和方法的实施、互动,正是为了实践学生自主学习的目的。③学生的学习为跳跃式,必须要供给足够的资料和文献,且学生的潜力巨大。其实,所有的探讨和改革目标都是为了实现教育部提出的“要把人才培养的质量和效果作为检验一切工作的根本标准”。

参 考 文 献

- [1] 朱亚先, 匡勤, 汪骋, 黄荣彬, 杨士姚, 郑兰荪. *大学化学*, **2020**, 35 (8), 1.
- [2] 徐光宪. *北京大学学报(自然科学版)*, **2002**, 38 (2), 149.
- [3] 宋天佑, 程鹏, 徐家宁, 张丽荣. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [4] 吴岩. *中国大学教学*, **2018**, No. 12, 4.
- [5] 教育部. 坚持以本为本 推进四个回归 建设中国特色、世界水平的一流本科教育. [2024-09-03].
http://www.moe.gov.cn/jyb_xwfb/gzdt_gzdt/moe_1485/201806/t20180621_340586.html
- [6] 成迎春. *化学教与学*, **2020**, No. 2, 45.
- [7] 张树永. *中国大学教学*, **2021**, No. 8, 42.
- [8] 习近平在全国高校思想政治工作会议上强调: 把思想政治工作贯穿教育教学全过程 开创我国高等教育事业发展新局面. *人民日报*. 2016-12-09 (01).
- [9] 教育部高等学校教学指导委员会. 北京: 高等教育出版社, 2018: 130-137.
- [10] 2013-2017年教育部高等学校化学类专业教学指导委员会. *大学化学*, **2016**, 31 (11), 11.
- [11] Werner, A. Z. *Anorg. Chem.* **1893**, 3, 267.
- [12] Leigh, G. J.; Winterton, N. *Modern Coordination Chemistry – The Legacy of Joseph Chatt*; The Royal Society of Chemistry: Cambridge, UK, 2002; pp. 100-122.
- [13] Seyferth, D. *Organometallics* **2001**, 20 (1), 2.
- [14] Jones, E. R. H.; Shen, T. Y.; Whiting, M. C. *J. Chem. Soc.* **1951**, 48, 763.
- [15] Whiting, M. C. *J. Organomet. Chem.* **2001**, 637-639, 16.
- [16] Fischer, E. O.; Hafner, W. *Zeitschrift für Naturforsch. - Sect. B J. Chem. Sci.* **1955**, 10, 665.
- [17] Ziegler, K.; Holzkamp, E.; Breil, H.; Martin, H. *Angew. Chem. Int. Ed.* **1955**, 67, 541.
- [18] Natta, G. *J. Polym. Sci.* **1955**, 16, 143.
- [19] 游效曾, 孟庆金, 韩万书. *配位化学进展*. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [20] Wilkinson, G.; Gillard, R. D.; McCleverty, J. A. *Comprehensive Coordination Chemistry*; Pergamon: Oxford, UK, 1987.
- [21] 游效曾. *配位化合物的结构和性质*. 北京: 科学出版社, 1992.
- [22] Hawthorne, M. F. *Nature* **2001**, 412, 696.
- [23] Jean-Marie Lehn – Facts. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2021. Wed. 15 Dec 2021. [2024-08-30]
<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1987/lehn/facts/>
- [24] Hoskins, B. F.; Robson, R. *J. Am. Chem. Soc.* **1989**, 111, 5962.
- [25] Yaghi, O. M.; Li, H. *J. Am. Chem. Soc.* **1995**, 117, 10401.
- [26] Yaghi, O. M.; Li, G.; Li, H. *Nature* **1995**, 378, 703.
- [27] Schmidt, G. M. J. *Pure Appl. Chem.* **1971**, 27, 647.
- [28] 徐光宪. *北京大学学报(自然科学版)*, **2002**, 38 (2), 149.
- [29] Lewis, G. N. *J. Am. Chem. Soc.* **1916**, 38, 762.

- [30] Laing, M. *J. Chem. Educ.* **1994**, 71, 472.
- [31] Sidgwick, N. V.; Powell, H. M. *Proc. R. Soc. London* **1940**, 176 (965), 153.
- [32] Kepert, D. L. *Quart. Rev.* **1957**, 11 (4), 339.
- [33] Gillespie, R. J. *Molecular Geometry*; Van Nostrand Reinhold: London, UK, 1972.
- [34] Gillespie, R. J.; Bytheway, I.; Dewitte, R. S.; Bader, R. F. W. *Inorg. Chem.* **1994**, 33 (10), 2115.
- [35] Gillespie, R. J.; Robinson, E. A. *Chem. Soc. Rev.* **2005**, 34 (5), 396.
- [36] Gmespie, R. J. *J. Chem. Educ.* **1970**, 47 (1), 18.
- [37] Pauling, L. *The Nature of the Chemical Bond*; Cornell University Press: Ithaca, NY, USA, 1939.
- [38] Henry Taube – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2021. Thu. 16 Dec 2021. [2024-08-30]
<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1983/taube/biographical/>
- [39] Shriver, D. F. *Acc. Chem. Res.* **1970**, 3, 231.
- [40] Vaska, L. *Acc. Chem. Res.* **1968**, 1, 335.
- [41] Werner, H. *Pure Appl. Chem.* **1982**, 54, 177.
- [42] 道格拉斯·约翰·纽曼, 贝蒂·吴·道格, 著. 晶体场手册. 张庆礼, 刘文鹏, 译. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012.
- [43] Jahn, H. A.; Teller, E.; Donnan, F. G. *Proc. R. Soc. Lond. A* **1937**, 161 (905), 220.
- [44] 章慧. 配位化学原理与应用. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [45] 丁延伟. 热分析基础. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2020.
- [46] 胡荣组, 高胜利, 赵凤起. 热分析动力学. 第2版. 北京: 科学出版社, 2018.
- [47] Li, H. L.; Eddaoudi, M.; O'Keeffe, M.; Yaghi, O. M. *Nature* **1999**, 402, 276.
- [48] Eddaoudi, M.; Kim, J.; Rosi, N.; Vodak, D.; Wachter, J.; O'Keeffe, M.; Yaghi, O. M. *Science* **2002**, 295, 469.
- [49] Férey, G.; Mellot-Draznieks, C.; Serre, C.; Millange, F.; Dutour, J.; Surble, S.; Margiolaki, I. *Science* **2005**, 309, 2040.
- [50] Zhang, J. P.; Zhang, Y. B.; Lin, J. B.; Chen, X. M. *Chem. Rev.* **2011**, 112, 1001.
- [51] Huang, X. C.; Zhang, J. P.; Chen, X. M. *Chin. Sci. Bull.* **2003**, 48, 1531.
- [52] Feng, D. W.; Gu, Z. Y.; Li, J. R.; Jiang, H. L.; Wei, Z. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, 51, 10307.
- [53] Feng, D. W.; Liu, T. F.; Su, J.; Bosch, M.; Wei, Z.; Wan, W.; Yuan, D.; Chen, Y. P.; Wang, X.; Wang, K.; *et al.* *Nat. Commun.* **2015**, 6, 5979.
- [54] Cavka, J. H.; Jakobsen, S.; Olsbye, U.; Guillou, N.; Lamberti, C.; Bordiga, S.; Lillerud, K. P. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, 130, 13850.
- [55] Ma, X. J.; Chai, Y. T.; Li, P.; Wang, B. *Acc. Chem. Res.* **2019**, 52 (5), 1461.
- [56] Imaz, I.; Rubio-Martinez, M.; An, J.; Sole-Font, I.; Rosi, N. L.; Maspoch, D. *Chem. Commun.* **2011**, 47 (26), 7287.
- [57] Zhai, Q. G.; Bu, X.; Mao, C.; Zhao, X.; Daemen, L.; Cheng, Y.; Ramirez-Cuesta, A. J.; Feng, P. *Nat. Commun.* **2016**, 7, 13645.
- [58] Zhai, Q. G.; Bu, X.; Zhao, X.; Li, D. S.; Feng, P. *Acc. Chem. Res.* **2017**, 50 (2), 407.
- [59] 杨奇, 陈三平, 谢钢, 高胜利. 中国大学教学, **2016**, No. 4, 31.
- [60] 薛东, 高玲香, 胡满成, 翟全国, 张伟强, 刘志宏, 高胜利. 大学化学, **2022**, 37 (11), 2111044.
- [61] 翟全国, 薛东, 魏灵灵, 胡满成, 高胜利. 大学化学, **2022**, 37 (11), 2208119.
- [62] 刘志宏, 胡满成, 高胜利. 化学教育, **2021**, 42 (12), 23.
- [63] 李淑妮, 翟全国, 魏灵灵, 蒋育澄, 刘志宏, 胡满成, 高胜利. 化学教育, **2022**, 43 (10), 29.
- [64] 翟全国, 蒋育澄, 胡满成, 李淑妮, 高胜利. 大学化学, **2022**, 37 (11), 2202048.
- [65] 王红艳. 氧化还原反应与电化学应用. 北京: 科学出版社, 2022.
- [66] 潘道皑, 赵成大, 郑载兴. 物质结构. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- [67] Luo, Y. R. *Comprehensive Handbook of Chemical Bond Energies*; CRC Press: Cleveland, OH, USA, 2007.
- [68] 张宇, 岑竞鹤, 熊文芳, 戚朝荣, 江焕峰. 化学进展, **2018**, 30, 547.
- [69] 马雪璐, 雷鸣. 化学进展, **2013**, 25, 1325.
- [70] 黄聪聪, 林莉莉, 李苏华, 张利, 苏成勇. 大学化学, **2020**, 35 (7), 88.
- [71] 陈之尧, 刘捷威, 崔浩, 张利, 苏成勇. 化学学报, **2019**, 77, 242.

- [72] 张红霞, 任建国. 化学研究与应用, **2001**, 13 (2), 133.
- [73] Zhang, J.; Cui, J.; Yang, X. *Sci. Sin. Chim.* **2020**, 50 (9), 1045.
- [74] 王成云. 曲阜师范大学学报(自然科学版), **2006**, 32 (4), 87.
- [75] 张树永. 中国大学教学, **2021**, No. 8, 42.
- [76] 邱伟光. 思想理论教育, **2017**, No. 7, 10.
- [77] 张树永. 大学化学, **2019**, 34 (11), 4.
- [78] 王红艳, 王凯, 焦桓, 刘志宏. 大学化学, **2021**, 36 (3), 2007034.
- [79] 展树中. 大学化学, **2020**, 35 (8), 107.
- [80] 章慧. 配位化学: 原理与应用. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [81] 梁晓华. 上海医药, **2013**, 34 (23), 3.
- [82] 郭世祺, 马荔. 大学化学, **2020**, 35 (1), 40.