

高等学校化学类专业无机化学相关实验教学内容与教学要求建议

章文伟^{1,*}, 任艳平², 李维红³, 邱晓航⁴, 石梅⁵, 刘欲文⁶, 王志林^{1,*}

¹ 南京大学化学化工学院, 化学基础国家级实验教学示范中心(南京大学), 南京 210023

² 厦门大学化学化工学院, 化学国家级实验教学示范中心(厦门大学), 福建 厦门 361005

³ 北京大学化学与分子工程学院, 化学基础国家级实验教学示范中心(北京大学), 北京 100871

⁴ 南开大学化学学院, 化学国家级实验教学示范中心(南开大学), 天津 300071

⁵ 复旦大学化学系, 化学国家级实验教学示范中心(复旦大学), 上海 200433

⁶ 武汉大学化学与分子科学学院, 化学国家级实验教学示范中心(武汉大学), 武汉 430072

摘要: 为了推进化学类专业本科教学质量国家标准和教育部化学类专业教学指导委员会相关要求的全面落实, 提升无机化学实验教学质量, 促进无机化学实验教学改革与建设, 本建议明确了化学类专业无机化学实验的教学目标, 给出了相应的实验教学内容和教学要求建议, 明确了相关教学实验所应达到的知识、能力与素质目标。各高校可参考本建议, 进一步优化无机化学相关实验教学内容, 提升实验教学质量。

关键词: 化学类专业; 无机化学实验; 教学内容; 教学要求; 建议

中图分类号: G64; O6

Suggestions on Teaching Contents and Requirements of Inorganic Chemistry Experiment for Chemistry Majors in Higher Education

Wenwei Zhang^{1,*}, Yanping Ren², Weihong Li³, Xiaohang Qiu⁴, Mei Shi⁵, Yuwen Liu⁶, Zhilin Wang^{1,*}

¹ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Nanjing University), School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China.

² National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Xiamen University), College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China.

³ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Peking University), College of Chemistry and Molecular Engineering, Peking University, Beijing 100871, China.

⁴ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Nankai University), College of Chemistry, Nankai University, Tianjin 300071, China.

⁵ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Fudan University), Department of Chemistry, Fudan University, Shanghai 200433, China.

⁶ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Wuhan University), College of Chemistry and Molecular Sciences, Wuhan 430072, China.

Abstract: This proposal aims to comprehensively implement the National Teaching Standards for Chemistry Majors and the guidelines from the Ministry of Education's Instructional Committee for Higher Chemistry Education. It focuses on enhancing the quality of inorganic chemistry experimental teaching, and promoting reform and construction in this area. The suggestions include clear teaching objectives, recommended experimental contents, and specific teaching

收稿: 2024-05-17; 录用: 2024-05-28; 网络发表: 2024-09-14

*通讯作者, Emails: wwzhang@nju.edu.cn (章文伟); wangzl@nju.edu.cn (王志林)

基金资助: 2018–2022年教育部高等学校化学类专业教学指导委员会教学研究课题

requirements to achieve targeted knowledge, skills, and competencies. Universities are encouraged to use these recommendations to optimize their inorganic chemistry experimental teaching and elevate the overall quality of experimental education.

Key Words: Chemistry major; Inorganic chemistry experiment; Teaching content; Teaching requirement; Suggestion

1 引言

无机化学是化学学科的重要分支学科,是研究和阐述化学元素及无机化合物的组成、性能、结构和反应的科学。化学实验教学是化学类专业人才培养过程中不可缺少的重要组成部分,是提高人才培养质量的重要环节。无机化学实验内容较为繁杂,涉及面宽,各高校通常会根据学生知识与能力基础的不同,在本科培养的不同阶段开设不同的实验内容。由于各高校的实验课程体系不尽相同,与无机化学实验关联的实验课程较多,如大一阶段的无机化学实验、普通化学实验、基础化学实验、大学化学实验、无机及分析化学实验、化学合成与表征等,大二或大三阶段的中级无机化学实验、综合化学实验、化学功能分子实验等。这些实验课程涵盖了元素和无机化合物的反应与制备、分离与提纯、分析与鉴定、性质与功能、结构与形态等,对于加强学生的实验操作技能,强化学生的安全环保意识,培养学生的科学思维和创新意识,提升学生综合分析和解决复杂问题的能力具有重要作用。

教育部高等学校化学类专业教学指导委员会(以下简称化学教指委)先后出台了《高等学校化学类专业指导性专业规范》^[1]、《普通高等学校本科专业类教学质量国家标准》^[2]和《化学类专业化学实验教学建议内容》^[3]三个指导性文件,对实验教学进行了架构,列出了实验教学知识点和技能点,但未明确实验能力和素质培养要求^[4]。受化学教指委委托,由南京大学牵头,联合厦门大学、北京大学、南开大学、复旦大学、武汉大学等高校开展“高等学校化学类专业无机化学相关实验教学内容与教学要求建议”(以下简称“建议”)的研制工作,通过结合一些典型实例,对无机化学实验教学中涉及的知识、能力和素质培养提出明确要求,以期指导当前无机化学实验教学内容和教学方法的改革与建设,提升实验教学质量。教育部化学实验教学改革创新虚拟教研室无机化学实验教研组对本建议进行了意见征求、讨论和完善。

本建议是指导性的,它既非无机化学实验教学的最高要求也不是最低要求,所列内容也非必须在无机化学实验中开设。各高校可以根据自身办学条件和定位,结合专业特色和学生就业发展需要增减相关内容,构建各具特色的实验教学体系和教学内容,满足人才培养的需要。

2 无机化学实验教学目标

在通常情况下,学生进入大学后接触的第一门实验课程为偏重基础的无机化学实验。之后随着专业知识的提升,在高年级进行更高阶的专业无机化学实验学习。综合考虑不同阶段学生的培养需要,在落实化学教指委建议的无机化学实验知识和技能点的基础上,无机化学相关实验应着力培养学生以下几方面的能力和素质:

- (1) 能够开展元素和无机化合物的制备、合成、分离和提纯;
- (2) 能够开展元素和无机化合物性质研究,明确重要元素单质及其化合物的性质、常见离子的特征反应等,并能选择适宜方法,对常见元素和无机化合物/混合物进行鉴定分析;
- (3) 能够选择合适的方法对无机化合物/无机材料进行表征、结构分析和性质研究;
- (4) 能够独立搭建实验装置,对仪器设备或实验装置进行检查和校准,能够规范操作仪器设备完成实验;
- (5) 能够全面细致观察实验过程,规范记录实验现象和实验数据;能够正确处理实验数据、表达和评价实验结果,得出相关规律和合理结论;

(6) 能够发现和提出问题, 并运用无机化学及其他相关学科的原理和方法综合分析并解决, 在解决问题的过程中体现科学思维 and 创新能力;

(7) 能够自主查阅资料, 用信息化手段辅助开展实验方案的设计和评价; 能够从法律和法规、安全和环保、社会和文化等多个角度对方案进行优化设计和综合评价, 明确个人的责任和义务。

在实验过程中养成严谨、求真、规范、定量、精确、质疑等基本研究素养, 树立合作意识和团队精神, 形成安全环保意识和绿色化学理念, 体现家国情怀和社会责任。

3 无机化学实验教学内容与教学要求建议

3.1 建议内容概述

本建议根据《化学类专业化学实验教学建议内容》^[3]中“II操作与技术”和“IV物质的合成与制备”所涉及的知识点, 结合无机化学实验教学目标, 参考国内外相关实验教材和文献^[5-48], 通过列举典型实验的方法, 明确实验所需达成的知识、能力和素质目标。其中知识目标包括事实性知识、概念性知识和程序性知识(技能和知识)。通过实验教学, 学生需要掌握程序性知识(任务和准则性知识)并达至元知识(策略和反思性知识), 实现实验教学的创新性、高阶性和挑战度。

3.2 具体内容与建议

具体内容分为三个部分: (I) 无机化学实验常用操作与技术; (II) 无机化学合成与制备方法; (III) 无机物质的制备与制取。

(I) 无机化学实验常用操作与技术。

无机化学实验常用操作与技术主要包括:

(1) 能够正确辨识和选择玻璃仪器; 能够选择适宜的方法对玻璃仪器进行洗涤和干燥; 能够正确组装和使用玻璃仪器;

(2) 能够进行溶液的配制、稀释、转移和定量移取;

(3) 能够选择适宜的仪器设备对样品进行称量;

(4) 能够正确取用试剂和样品, 能够规范、准确地进行样品的采集/取样、保存、预处理和制备;

(5) 能够选择适宜的沉淀剂、浓度和用量, 完成沉淀、沉淀转移、洗涤、干燥等操作;

(6) 能够根据样品的性质选择适宜的加热设备和方法; 能够评价各类加热方法的优劣;

(7) 能够根据体系性质选择适宜的冷却方法并完成冷却操作;

(8) 能够选择适宜的搅拌方式, 保证搅拌效果;

(9) 能够选择并正确组装装置, 完成气体的制备、纯化、干燥和吸收;

(10) 能够正确选择蒸发、结晶、倾析、常压过滤、减压过滤、正压过滤、热过滤、离心分离、分液、重结晶、升华、柱色谱分离等方法完成物质的分离、提纯等操作;

(11) 能够正确搭建、检测和使用无水无氧系统;

(12) 能够正确选择和使用仪器设备, 完成必要的鉴定、表征、测量和性质研究。

(II) 无机化学合成与制备方法。

无机化学常用的合成反应包括化合反应、分解反应、置换反应、复分解反应、氧化还原反应。

除了常见的气相、溶液反应之外, 学生还需要掌握以下与无机化学合成密切相关的实验方法:

(II-1) 固相合成法。

参考实验项目: 配合物 $[\text{Ni}(\text{Me}_3\text{en})(\text{acac})]\text{BPh}_4$ 的合成及其溶剂/热致变色行为研究(低温)^[5,6]; 二甘氨酸合铜的制备(低温)^[7]; 低热固态反应合成热致变色材料^[8]; 硫氧化镧铽荧光粉的固相合成和发光性能的测试^[9]; 绿色长余辉荧光材料 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 的合成和表征(高温)^[10]; Bi系2212相超导材料的制备、晶体生长(高温)^[11]; 氮化硼的制备(高温)^[12]; 石墨烯的绿色制备、表征及典型应用综合型实验(球磨)^[13]。

教学目标: (1) 能够说明固相合成的原理和类型, 阐述固相合成的意义, 说明固相合成的优缺

点；(2) 能够根据原料、产物及固相合成所需反应条件，正确选择和使用相应的反应器皿和设备；(3) 能够在适宜的条件下采用固相合成方法制备目标化合物或材料。

(II-2) 高温合成法。

参考实验项目：无水氯化铬的制备^[8,12]；由钛铁矿制备/提取二氧化钛^[14-16]；绿色长余辉荧光材料 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$ 的合成和表征^[10]；柠檬酸法制备固体燃料电池SDC粉体^[17]；Bi系超导材料的制备与晶体的生长^[11]； $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 超导体的合成^[18]。

教学目标：(1) 能够阐述采用高温合成的原因；(2) 能够说明高温合成的注意事项，并使用适宜的加热设备进行高温反应；(3) 能够通过高温合成法制备目标化合物或材料。

(II-3) 水热与溶剂热合成法。

参考实验项目：水热法制备纳米 SnO_2 微粉^[9,19]；纳米 SnO_2 气体传感器的水热合成及乙醇检测^[18]；溶剂热法制备纳米 TiO_2 及其结构表征和光催化活性^[6]；钛酸盐纳米管的水热合成^[12]；MOF-5的合成与表征^[20]；MCM-41有序介孔分子筛的制备、纳米组装及性能研究^[21]；PKU系列孔道硼铝酸的合成及表征^[9]。

教学目标：(1) 能够阐述水热与溶剂热反应的概念、特点、机理，说明该方法在合成无机功能材料、特种组成与结构的无机化合物及特种凝聚态材料中的应用；(2) 能够说明反应釜的结构和使用注意事项，正确使用反应釜；(3) 能够通过水热或溶剂热合成工艺，采用适宜的条件制备目标化合物、材料或晶体。

(II-4) 溶胶-凝胶合成法。

参考实验项目：纳米 TiO_2 粒径可控合成及其光催化性质研究^[18]；金属有机骨架化合物HKUST-1纳米晶的合成及其染料吸附性质研究^[18]；二氧化钛纳米颗粒的溶胶-凝胶法制备、表征及其在超级电容器方面的性质研究^[21]；柠檬酸法制备固体燃料电池SDC粉体^[17]。

教学目标：(1) 能够阐述溶胶-凝胶合成法的概念、特点及其在合成无机化合物和无机材料尤其是纳米材料中的应用；(2) 能够阐述溶胶-凝胶合成法制备纳米材料的机理；(3) 能够说明溶胶-凝胶合成法制备纳米材料的注意事项，并选择适宜的反应条件制备目标化合物。

(II-5) 模板合成法。

参考实验项目：模板法合成剪切DNA的金属配合物^[18]；以席夫碱为配体的一些镍(II)配合物^[22]；金属酞菁的合成和表征^[22]；大环化合物 $[\text{Ni}(\text{14})_4,11\text{-二烯-N}_4]_2$ 的合成及其表征^[8]；MCM-41有序介孔分子筛的制备、纳米组装及其性能^[21]；磷酸铝类化合物模板固相合成及其吸附性质研究^[23]。

教学目标：(1) 能够阐述模板合成的原理、分类和特点；(2) 能够说明模板反应在无机合成中的应用，并通过模板反应制备特殊结构大环化合物或具有一定形貌的材料。

(II-6) 光化学合成法。

参考实验项目：纳米银的光化学转化^[24]； $\text{Ru}(\text{CO})_4(\eta^2\text{-alkene})$ 化合物的光化学合成及配体交换反应^[25]；类石墨相氮化碳的制备及太阳能驱动制氢实验^[26]。

教学目标：(1) 能够阐述光化学反应的原理和特点，并说明其应用前景；(2) 能够说明影响光化学合成反应的因素，并选择合适的光源、功率、反应时间等制备目标化合物。

(II-7) 电化学合成法。

参考实验项目：电解 MnO_2 的制备与在KOH溶液中的电化学行为^[9]；电解法制备高锰酸钾^[15] (由软锰矿制备高锰酸钾^[12,16])；过二硫酸钾的制备和鉴定^[15] (电解法制备 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ^[8])；碘酸钾的制备与分析^[12]； $[\text{Ph}_3\text{Ph}]_2[\text{CoCl}_4]_2$ 配合物的电化学合成和性质测定^[27]；金、银纳米粒子的直接电化学还原合成及其相关表征^[28]。

教学目标：(1) 能够阐述电极反应主要特征、电化学合成方法的基本原理和特点；(2) 能够说明影响电化学合成的因素，正确搭建电化学反应装置，合理选择电极，设置合适反应条件和参数(电解质组成、温度、电流密度、电压等)制备目标化合物。

(II-8) 催化反应合成法。

参考实验项目：三氯化六氨合钴(III)的合成与组成测定^[7,27]；钴基催化剂的合成及可见光驱动光催化CO₂还原^[18]。

教学目标：(1) 能够阐述催化反应的特点及其应用前景；(2) 能够说明催化剂在反应过程中的作用，阐述催化机理；(3) 能够制备相关催化剂，并通过催化反应制备目标化合物。

(II-9) 相转移反应合成法。

参考实验项目：油水两相转移功能的二氧化硅材料制备及性能研究^[29]。

教学目标：(1) 能够阐述相转移反应的概念、机理和优点；(2) 能够说明在异相反应过程中使用相转移催化剂的目的和意义；(3) 能够采用相转移方法合成相关化合物。

(II-10) 微波与超声合成法。

参考实验项目：二甘氨酸合铜的微波合成^[7]；水杨醛缩邻苯二胺与Cu(II)、Ni(II)配合物的微波合成与表征^[30]；微波辐射法制备Na₂S₂O₃·5H₂O^[31,32]；微波辅助水热合成多孔配位聚合物MOF-5及其表征^[33]。

教学目标：(1) 能够阐述微波辐射合成的原理、特点和优势；(2) 能够说明影响微波合成的因素，并能够合理设置微波功率和反应时间，制备目标化合物。

(II-11) 自组装与层-层组装合成法。

参考实验项目：金属-有机笼在水中的自组装、客体捕获和核磁共振波谱^[34]；制备和表征三螺旋配合物的快速直接超分子自组装实验^[35]；自组装膜的制备及其表征^[9]；自组装膜表面pK_a的电化学测定^[11]；硫醇自组装动力学的测定^[11]；纳米组装血红蛋白的直接电化学和催化研究^[21]；

教学目标：(1) 能够阐述自组装与层-层组装的原理和方法；(2) 能够通过自组装或层-层组装合成法，制备自组装超分子、单分子膜或层-层组装复合物；(3) 能够说明表面性质与本体性质的不同，并说明这种差别在表面修饰中的应用。

(II-12) 晶体生长法。

参考实验项目：五水硫酸铜的制备及大晶体培养^[7]；胆矾晶种和完美大晶体制备^[36]；废铝箔制备硫酸铝钾大晶体^[16]；两种水合草酸合铜酸钾晶体的控制生长^[36]；碳酸钡晶体的制备与晶形观察^[37]；KDP(磷酸二氢钾)晶体的合成与表征^[22]；K₃[Fe(C₂O₄)₃]·3H₂O单晶的制备及其结构测定^[11]；单晶的制备及其结构的计算机解析^[23]；可逆SCSC转变中铜(II)配合物的可视变色：结构对颜色的影响^[38]。

教学目标：(1) 能够阐述晶体的不同制备方法和影响晶体生长的因素(温度、过饱和度、湿度、陈化时间、晶种等)；(2) 能够通过挥发、扩散、结晶、气相沉积和外延生长等方法培养晶体。

(II-13) 化学气相沉积法。

参考实验项目：化学气相沉积法制备碳纳米管^[11]。

实验建议：(1) 能够阐述化学气相沉积法的原理、特点及应用范围；(2) 能够说明影响化学气相沉积的因素(温度、载气流量、沉积时间等)；(3) 能够正确使用高温装置(如管式炉等)进行化学气相沉积。

(III) 无机物的制备与制取。**(III-1) 单质。**

参考实验项目：(1) 铜循环^[39]；(2) N₂及Mg₃N₂制备^[6]。

教学目标：(1) 能够阐述单质的制备原理和方法(氧化还原反应)；(2) 能够说明物质纯化的原理和方法；(3) 能正确进行气体的洗涤、干燥和收集。

(III-2) 无机化合物(盐、氧化物、硫化物等)。

参考实验项目：硝酸钾的制备^[7,40]；氨碱法制取碳酸钠^[41]；硫代硫酸钠的制备^[16,40]；无水合硫酸铜的制备^[7,39,40]；硫酸亚铁铵的制备^[7,39,40]/硫酸亚铁铵的制备及组成分析^[31]；硫酸铝钾的制备^[40]/由易拉罐制备明矾及其纯度测定^[15,41]；葡萄糖酸锌的制备^[14]/葡萄糖酸锌的合成及表征^[40]/葡萄糖酸锌

的制备及纯度测定^[41]/葡萄糖酸锌的制备及成分分析^[17]; 硫酸亚铁的制备及化学式的测定^[7,39]; 碱式碳酸铜的制备及铜含量测定^[7,40]; 氯化亚铜的制备^[40]; 四碘化锡的制备及最简式的确定^[42]; 过碳酸钠的合成及活性氧的组成测定^[42]。

教学目标: (1) 能够阐述制备无机化合物的常见原理和方法; (2) 能够搭建适宜的反应装置, 采用适宜的反应条件, 完成目标化合物的合成、分离和提纯; (3) 能够设计去杂的合理方案, 阐述除杂的原理, 完成除杂操作并能选择适宜的方法检验除杂效果; (4) 能够鉴定常见的阳离子和阴离子, 如 K^+ 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 $C_2O_4^{2-}$ 等; (5) 能够选择适宜的方法, 对产物及其含量等进行必要的鉴定和测量, 获得产率/收率、纯度等数据。

(III-3) 配合物。

参考实验项目: 三氯化六氨合钴(III)的制备和组分的测定^[7,16,43]; 二草酸根合铜(II)酸钾的制备及组成测定^[7,16,43]; 三草酸合铁(III)酸钾的制备及成分分析^[7,17]/三草酸合铁(III)酸钾的制备及酸根离子(配阴离子)电荷数的测定^[16,39]; 三(8-羟基喹啉)合铝配合物的合成与发光性能^[16]; 热致变色示温材料^[37]; 顺、反式二甘氨酸合铜的制备及成分分析^[17]; 配合物几何异构体 *cis*- $K[Cr(C_2O_4)_2(H_2O)_2]$ 和 *trans*- $K[Cr(C_2O_4)_2(H_2O)_2]$ 的制备及其异构化速率常数和活化能测定^[11,27]; 配合物键合异构体 $[Co(NH_3)_5NO_2]Cl_3$ 和 $[Co(NH_3)_5ONO]Cl_3$ 的制备、鉴别和异构化速率常数测定^[8,11,27,40]; 三(乙二胺)合钴盐光学异构体的制备和拆分^[23]/三(乙二胺)合钴配离子光学异构体的制备、离析和旋光度测定^[8]/三(乙二胺)合钴配离子旋光异构体的拆分^[20]/ $[Co(en)_3]^{3+}$ 单一光学对映体的催化拆解制备^[22]; $[Co(II)(Salen)]$ 配合物的制备和载氧作用^[8,11]/ $[Co(II)(Salen)]$ 载氧体的制备及吸氧性质的测定^[9]/载氧体模拟物的合成及载氧作用^[22]; 醋酸亚铬二水合物的合成与鉴定^[9]; 二(乙酰丙酮)氧钒(IV)合成与波谱研究^[23]; 五配位化合物: $[VO(acac)_2]$ 和 $[Cr(NH_3)_6][CuCl_5]$ ^[22]; 稀土离子荧光配合物的制备与光谱性能表征^[28]; 以席夫碱为配体的一些镍(II)配合物^[22]; 金属酞菁的合成和表征^[22]; 大环化合物 $[Ni(14)4,11\text{-二烯-N}_4]I_2$ 的合成及其表征^[8]; 手性 Mn-Salen 配合物的合成及其环氧化催化性能研究^[21]; 自旋转换配合物 $[Fe(Htrz)_3](ClO_4)_2$ 的合成及其磁性研究^[21]; 磷光铱配合物 $Ir(ppy)_2acac$ 的合成和发光性能研究^[21]。

教学目标: (1) 能够阐述配合物的合成原理和方法; (2) 能够设计合成方案, 搭建合成装置, 完成目标配合物的合成、分离和提纯等操作; (3) 能够选择适宜的方法对合成的配合物进行鉴定和纯度分析; (4) 能够利用物理、化学方法对配合物的结构进行表征, 对性质进行研究。

(III-4) 金属有机化合物。

参考实验项目: 二茂铁的制备及光谱电化学研究^[19]/二茂铁及其衍生物的合成、表征及电化学性质研究^[20]/二茂铁及其衍生物的合成与性质测定^[11]; 1,1'-双(二苯基膦)二茂铁的合成^[14]; 二氯二茂钛的合成与表征^[19]; 1,3,5-三甲苯三羰基钼 $[1,3,5\text{-C}_6\text{H}_3(\text{CH}_3)_3]Mo(CO)_3$ 的制备与鉴定^[9]; 羰基二(三苯基膦)氯化铱(I)配合物的合成^[18]。

教学目标: (1) 能够说明金属有机化合物常见的合成方法; (2) 能够正确搭建实验装置, 掌握无水无氧合成技术, 并采取适宜的方法(重结晶、柱色谱等)进行物质分离和提纯; (3) 能够选用适宜的仪器和方法, 对合成的物质进行鉴定和分析; (4) 能够对合成的金属有机化合物的性质进行研究, 说明其构效关系。

(III-5) 多孔材料。

参考实验项目: 微孔分子筛的制备及其物性表征^[8]; ZSM-5 分子筛的合成与表征^[20]; MCM-41 型介孔分子筛的合成、孔道功能化与金属吸附性测定^[8]; MCM-41 有序介孔分子筛的制备、纳米组装及其性能^[21]; 多孔金属-有机骨架化合物的制备和性质表征^[44]。

教学目标: (1) 能够阐述多孔材料常见合成方法及孔道功能化修饰方法; (2) 能够说明影响多孔结构形成的因素(原料配比、体系均匀度、反应温度、pH、晶化时间等); (3) 能够选择适宜的模板剂控制孔道结构, 合成符合要求的多孔材料; (4) 能够采用适宜的设备和方法, 测量物相、形貌、比表面积、孔体积、孔径分布、热稳定性等性质; (5) 能够拓展多孔材料的应用。

(III-6) 纳米材料。

参考实验项目：金纳米粒子的制备、表面修饰及表征^[44]；金纳米粒子的合成及其在半胱氨酸比色检测中的应用^[28]；金纳米星的可控合成及其形貌对光学性能影响的探究^[28]；银纳米片的制备及紫外可见光谱分析^[17]；纳米氧化锌制备及其光催化性能研究^[17]；不同形貌氧化锌的制备及光催化性能^[45]；TiO₂纳米晶体的溶胶-凝胶法制备及X射线粉末衍射分析^[40]；水热法合成纳米二氧化钛^[20]；水热合成锐钛矿相TiO₂纳米棒及其表征^[33]；纳米TiO₂粒径可控合成及其光催化性质研究^[18]；纳米晶TiO₂太阳能染料电池的制作及性能测定^[8]；二氧化钛纳米颗粒的溶胶-凝胶法制备、表征及其在超级电容器方面的性质研究^[21]；纳米SnO₂气体传感器的水热合成及乙醇检测^[18]； γ -Al₂O₃催化剂的凝胶法制备及性能测定^[8]； α -Fe₂O₃纳米颗粒的制备及催化性能测试^[44]；SiO₂微球的合成及其原子力显微镜AFM表征^[19]；ZnS纳米材料的可控合成、组装及光电性能研究^[19]；控制合成CdSe量子点及其光学性质测定^[11]；水热法合成BiOCl纳米片及其光还原二氧化碳测试^[20]；化学共沉淀法制备铁酸锌纳米材料^[40]；纳米稀土磷酸盐荧光材料和合成与性质测定^[20]；一锅法制备具有优异光电特性的半导体纳米材料^[28]；水溶性纳米发光探针的制备及表征^[44]；纳米碳酸钙的沉淀法制备及表征^[45]；牛奶碳量子点的制备与梯度萃取分离^[46]；钙钛矿量子点的合成、表征及发光器件制备^[21]。

教学目标：(1) 能够说明纳米材料的常见合成方法(化学共沉淀法、溶胶-凝胶法、水热法、溶剂热法等)；(2) 能够阐述影响纳米材料粒径和形貌的主要因素(浓度、温度、pH、晶化时间、模板等)，并选择适当方法和条件，实现纳米材料的可控合成；(3) 能够说明纳米材料的常见表征方法，能够设计表征方案，对材料的物相、晶粒度、表面形貌和尺寸进行表征；(4) 能够对纳米材料的性质进行研究并拓展应用。

(III-7) 簇合物。

参考实验项目：具有异构发光变色的多核铜(I)配合物的制备及铜含量的测定^[6]；单分子磁体[Mn₁₂O₁₂(O₂CMe)₁₆(H₂O)₄]的合成和表征^[21]；异金属三核氧心羧酸配合物的合成和表征^[9]；一种聚集诱导发光(AIE)铜碘簇合物的合成及其在构筑长余辉发光材料中的应用^[6,47]。

教学目标：(1) 能够说明簇合物的合成方法和原理；(2) 能够设计并完成簇合物的合成；(3) 能够设计适宜的方法对簇合物的组成进行测定和分析；(4) 能够选择适宜的仪器和方法对簇合物进行表征。

(III-8) 配位聚合物。

参考实验项目：金属有机骨架化合物HKUST-1纳米晶的合成及其染料吸附性质研究^[18]；MOF-5的合成与表征^[20]；金属有机框架材料UiO-66的合成及染料吸附性能测试^[26]；多孔金属-有机框架化合物的制备和表征^[44]。

教学目标：(1) 能够阐述配位聚合物(金属有机骨架化合物)的一般合成方法及其原理；(2) 能够选取合适的配体和金属，设计并定向合成具有特定结构和功能的金属有机骨架化合物；(3) 能够通过单晶培养和单晶衍射等方法进行配位聚合物的晶体结构解析；(4) 能够选用适宜方法对配位聚合物进行物相分析；(5) 能够根据配位聚合物的性质设计和开发相关应用。

(III-9) 非化学计量比化合物、插层化合物/嵌入化合物。

参考实验项目：YBa₂Cu₃O_{7-x}超导体的合成^[18]；Bi系超导材料的制备与单晶的生长^[11]；非化学计量比化合物Na_xWO₃的制备与鉴定^[8]；插层物——固体化学研究中令人兴奋的化合物^[48]。

教学目标：(1) 能够阐述非化学计量比化合物及插层化合物/嵌入化合物的一般合成方法；(2) 能够选择合适的方法合成非化学计量比化合物及插层化合物/嵌入化合物；(3) 能够选用适宜的仪器和方法对非化学计量比化合物及插层化合物/嵌入化合物的组成和性质进行表征和测定；(4) 能够说明各种缺陷(结构缺陷、价态缺陷、电子缺陷)对非化学计量比化合物光、电、磁、力和热等性质带来的影响及其应用价值。

(III-10) 杂多化合物。

参考实验项目：一种Keggin构型的杂多化合物的合成与表征^[20]；杂多化合物 $K_5CoW_{12}O_{40} \cdot 20H_2O$ 的合成^[44]；十二钨磷酸和十二钨硅酸的制备^[40,43]。

教学目标：(1) 能够说明杂多化合物的一般合成方法、影响因素及纯化方法；(2) 能够设计合成方案，搭建合成装置，控制合成条件，合成纯净的杂多化合物；(3) 能够采用合理的仪器设备，对杂多化合物的组成和结构等进行表征。

(III-13) 超分子化合物。

参考实验项目：环糊精衍生物对核苷酸的包合作用^[18]；环糊精衍生物对氨基酸的手性识别^[18]；极性超分子陀螺的制备及介电弛豫动力学^[18]；葫芦[6]脲的制备及其主客体相互作用性质探究^[28]。

教学目标：(1) 能够阐述大环主体分子的合成原理与分离方法；(2) 能够说明主客体相互作用的机制，说明超分子在分子识别、药物运输、分子机器构筑等方面的应用潜力；(3) 能够选择适宜的仪器和方法对主客体分子的作用方式、键合常数、热力学参数(如 K 、 ΔH 、 ΔG 、 ΔS 等)进行测量；(4) 能够对超分子化合物的性质进行研究。

4 无机化学实验教学建议

本建议是对《化学类专业化学实验教学建议内容》中“II 操作与技术”及“IV 物质的合成与制备”所涉及的相关知识和技术的细化落实，明确了所需达到的能力和素质要求，并给出了一些代表性实验供读者参考。由于不同高校化学类专业的办学定位和人才培养目标不同，各高校可以在建议内容的基础上，根据自身特色和毕业生就业发展需要，结合学科特色、学科发展需要和实验教学创新性、高阶性、挑战度要求，选择实验教学内容，明确教学要求，并按照产出导向理念明确考核的标准和要求。建议在选择实验时强化与科技前沿和生产实际的衔接，体现“四个面向”要求，增强实验教学的内涵和意义，提升学生的实验兴趣，并更好地融入课程思政、信息素养和创新意识教育元素，提升实验的综合育人效果。

此外，建议各高校积极建设线上资源，包括操作视频、原理讲解视频、虚拟仿真实验等，推动学生利用课余时间自主学习、主动思考，提升学生的自主学习能力和信息化素养。建议教师通过教学设计，增设探究环节，开展研究型教学，强化课外拓展，努力提升学生发现问题、分析问题和解决问题的能力，培养学生的综合素质、科学思维、创新意识和研究能力。

致谢：感谢全国四十余所高校提供本校无机化学实验教学开展情况；感谢化学实验教学改革研究虚拟教研室无机化学实验虚拟教研组全体教师参与讨论并提出宝贵建议；感谢教育部化学类专业教学指导委员会委员、山东大学张树永教授对本建议给予悉心指导；感谢南京大学朱婷玉老师帮助收集整理各高校无机化学实验教学开展的项目。

参 考 文 献

- [1] 教育部高等学校化学化工教学指导委员会化学类专业教学指导分委员会. 高等学校化学类专业指导性专业规范. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [2] 教育部高等学校教学指导委员会. 普通高等学校本科专业类教学质量国家标准(上). 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [3] 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, **2017**, *32* (8), 1.
- [4] 张树永, 朱亚先, 张剑荣. 大学化学, **2018**, *33* (10), 1.
- [5] 董志强, 阮婵姿, 张春艳, 易波, 陈欣, 陈焯超, 吕银云, 许振玲, 潘蕊, 翁玉华, 等. 大学化学, **2023**, *38* (9), 313.
- [6] 任艳平, 王翊如, 邓顺柳, 黎朝, 连伟. 大学化学实验. 北京: 高等教育出版社, 2024.
- [7] 南京大学大学化学实验教学组. 大学化学实验. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2018.

- [8] 李珺, 张逢星, 李剑利. 综合化学实验. 北京: 科学出版社, 2011.
- [9] 范星河, 李宝国. 综合化学实验. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [10] Ma, Y.-Z.; Jia, L.; Ma, K.-G.; Wang, H.-H.; Jing, X.-P. *J. Chem. Educ.* **2017**, *94*, 1157.
- [11] 章文伟. 综合化学实验. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [12] 张其颖, 王麟生, 陈波. 元素化学实验. 上海: 华东师范大学出版社, 2006.
- [13] 王楠, 王芹, 王宏, 陈芳, 刘敏, 朱丽华. 大学化学, **2023**, *38* (9), 218.
- [14] 武汉大学化学与分子科学学院实验中心. 无机化学实验. 第2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2021.
- [15] 范勇, 屈学俭, 徐家宁. 基础化学实验无机化学实验分册. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [16] 石建新, 巢晖. 无机化学实验. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [17] 中国科学技术大学无机化学实验课题组. 无机化学实验. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012.
- [18] 毛宗万, 姜隆, 张伟雄, 乔正平, 张艺, 肖小华. 综合化学实验. 北京: 科学出版社, 2020.
- [19] 孙学芹, 刘洪来. 综合化学实验. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [20] 徐家宁, 郭玉鹏. 化学综合实验. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [21] 章文伟, 谌东中. 化学功能分子实验. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- [22] 王尊本. 综合化学实验. 第2版. 北京: 科学出版社, 2007.
- [23] 杜志强. 综合化学实验. 北京: 科学出版社, 2005.
- [24] Cardoso-Avila, P. E.; Molina, J. L. P. *J. Chem. Educ.* **2018**, *95*, 2304.
- [25] Cooke, J.; Berry, D. E.; Fawkes, K. L. *J. Chem. Educ.* **2007**, *84*, 115.
- [26] 王学文, 刘文明. 化学综合实验. 北京: 科学出版社, 2019.
- [27] 王伯康. 综合化学实验. 南京: 南京大学出版社, 1999.
- [28] 尉云平, 贝逸翎. 新编综合化学实验. 北京: 化学工业出版社, 2022.
- [29] 曹捷, 郝雅娟, 程芳琴, 杨恒权. 山西大学学报(自然科学版), **2019**, *42* (1), 202.
- [30] 王成刚, 涂海洋. 综合化学实验教程. 武汉: 华中师范大学出版社, 2012.
- [31] 大连理工大学无机化学教研室, 牟文生. 无机化学实验. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [32] 孟长功. 基础化学实验. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [33] 龚宁, 单丽伟, 许河峰. 无机及分析化学实验. 北京: 科学出版社, 2020.
- [34] Go, E. B.; Srisuknimit, V.; Cheng, S. L.; Vosburg, D. A. *J. Chem. Educ.* **2016**, *93*, 368.
- [35] White, N. G. *J. Chem. Educ.* **2018**, *95*, 648.
- [36] 赵新华. 无机化学实验. 第4版. 北京: 北京师范大学出版社, 2014.
- [37] 龚跃法. 基础化学实验——无机与分析化学实验分册. 北京: 高等教育出版社, 2020.
- [38] 齐继, 朱建安, 张延旭, 杨嘉豪, 张春婷. 大学化学, **2024**, *39* (3), 43.
- [39] 北京大学化学与分子工程学院普通化学实验教学组. 普通化学实验. 第3版. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [40] 邱晓航, 李一峻, 韩杰, 尚贞锋. 基础化学实验. 第2版. 北京: 科学出版社, 2017.
- [41] 芦昌盛, 王凤彬. 简明化学实验. 南京: 南京大学出版社, 2019.
- [42] 兰州大学化学化工学院大学化学实验中心 编著, 陆广农 修编. 大学化学实验 基础化学实验I(上册). 兰州: 兰州大学出版社, 2011.
- [43] 陈三平, 崔斌. 基础化学实验I——无机化学与无机分析实验. 北京: 科学出版社, 2011.
- [44] 首都师范大学化学实验教学中心. 化学综合实验. 北京: 科学出版社, 2017.
- [45] 刘希光. 综合化学实验. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [46] 王薇, 韩帅, 唐晓亮, 郭礼荣, 唐瑜. 大学化学, **2021**, *36* (4), 2005013.
- [47] 曾梵誉, 白冰, 兰佳琦, 刘园园, 张宗培, 李恺. 大学化学, **2023**, *38* (4), 207.
- [48] Blyth, K. M.; Ogden, M. I.; Phillips, D. N.; Pritchard, D.; van Bronswijk, W. *J. Chem. Educ.* **2005**, *82*, 453.