

无机化学中“碱金属元素”教学内容的重构

王颖¹, 翟全国^{1,*}, 王志强², 雷青娟², 高胜利^{1,*}

¹ 陕西师范大学化学化工学院, 西安 710119

² 中北大学材料科学与工程学院, 太原 030051

摘要: 基于“碱金属元素”教学如何做到“实、深、厚”, 达到“知识-能力-素质”的有机融合, 其教学内容有必要进行重构。针对以往教学设计存在内容单一、不能反映相应学科最新进展等短板, 我们在教学内容重构中, 注重教学设计的完整性、科学性和应用性, 内容模块的先进性和合理性, 学科发展的融合性, 以及专业与思政同向同行等方面, 以期体现以学生为本的理念, 遵循认知规律, 有效提高教学内容的“高阶性、创新性和挑战度”, 以实现“知识-能力-素质”的有机融合。

关键词: 碱金属元素; 核心内容; 高阶性; 创新性; 挑战度

中图分类号: G64; O6

Reconstruction of the Teaching Content about the “Alkali Metal Elements” in Inorganic Chemistry

Ying Wang¹, Quanguo Zhai^{1,*}, Zhiqiang Wang², Qingjuan Lei², Shengli Gao^{1,*}

¹ School of Chemistry and Chemical Engineering, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China.

² School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China.

Abstract: To achieve a well-balanced integration of knowledge, skills, and competencies in the teaching of alkali metal elements, it is necessary to restructure the teaching content to ensure depth, breadth, and rigor. Traditional teaching approaches often suffer from limited scope, outdated content, and insufficient reflection of recent advancements in the field. In response to these challenges, this study focuses on enhancing the completeness, scientific rigor, and applicability of fundamental knowledge, ensuring the progressiveness and coherence of content modules, integrating disciplinary advancements, and aligning professional training with ideological and political education. By adhering to student-centered principles and cognitive learning theories, the revised content aims to enhance the advanced, innovative, and challenging nature of the curriculum, ultimately achieving the organic integration of knowledge, skills, and competencies.

Key Words: Alkali metal element; Central content; High level; Innovation; Challenging

“碱金属元素”不仅是高中化学的“核心素养”, 也是高考的必考知识点^[1]; 更是大学无机化学中元素化学教学的开卷之作^[2,3]。然而, 该部分内容存在着教学条块僵硬、内容相对陈旧、与相应的学科发展脱节等短板。目前, 授课过程中常以“碱金属的化学性质显示出十分明显的同系行为, 是元素周期性的最好例子”一句结束课堂教学, 或者让学生自学。而碱金属元素中的部分内容又已在

收稿: 2024-07-11; 录用: 2024-09-18; 网络发表: 2025-03-26

*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(师范)专业建设虚拟教研室”建设经费

高中课堂中讲授, 这使学生的自学兴趣不高, 难以发挥自学的主动性。在新时代背景下, 碱金属元素, 尤其是单质/化合物的性质、制备、重要反应、在新兴材料中的应用等变得尤为重要, 其在大学教学中的比重也需要相应的增加。正如郑兰荪院士在写给《非金属元素同素异形体综论》一书的序中写的“据我了解, 其中的一些知识点并没有在许多高校的本科生必修课程中教授”^[4]。基于以上问题, 本文针对碱金属元素教学的必要性、目前教学中存在的问题、以及课堂教学的创新性等问题展开讨论。

在近些年的“无机化学”教学研究中, 我们深感只有做到教学内容构建的“高阶性、创新性和挑战度”, 才能真正实现“知识-能力-素质”的有机融合, 从而有利于教学质量的提高。基于对教学内容的理解和思考, 我们在“碱金属元素”的教学内容重构方面进行了一些尝试, 并在此提出具体做法, 希望能引起碱金属元素教学部分的思考, 推动碱金属元素部分的教学改革。

1 “碱金属元素”内容缺失在哪里

1.1 内容单一缺失科学性

现行教材, 绝大多数是将“碱金属和碱土金属”合为一章, 冠以“s区元素”进行课堂授课。也正是由于碱金属元素结构特点相似、性质相近的特点, 授课时常常以“化学性质显示出十分明显的同系行为”为信条, 在课堂教学中主要以其正一/二价金属离子性质、单质、化合物、盐类等几个模块概述, 或者是对碱金属元素、化合物的结构、性质、制备和应用的简单介绍, 并不涉及深入的知识点。课堂教学中, 从高中到大学讲述的概念一直是“碱金属是极好的电子供体, 外层的一个电子给予受体原子或分子, 就可以形成阳离子。由此产生的阳离子有一个填充饱满外轨道, 类似稳定稀有气体的电子排布”。因此, 人们认为, 除了金属和合金, 碱金属化合物一直以阳离子形式出现, 且只有+1价的氧化态存在。而随着科学的发展, 人们逐渐认识到碱金属元素也是可以形成阴离子的。历史研究中早已发现, 碱金属在气相中可以以阴离子的形式存在^[5,6]。20世纪60年代也已考证, 金属氨溶液^[7,8]和金属胺溶液中^[9]的主要物种是碱金属阴离子。1974年, 戴伊(James L. Dye, 1927-)首次成功制备了Na⁻阴离子的固体盐^[10,11], 并且在之后的科学发展中, 更多的碱金属阴离子被广泛研究^[12,13]。戴伊在2015年写了一篇综述“The alkali metals: 200 years of surprises”(碱金属: 200年的惊喜)^[14], 文中在概述研究过程后说, 碱化物的合成可以促使电子化物的结晶, 被捕获的电子可以作为阴离子。由于捕获电子所在位置、几何形状和连接性的不同, 使电子化物表现出不同的电和磁性质。2009年另一个重大的发现是, 在实验过程中碱金属在高压下失去了它们的金属特性, 这主要是由于电子被定位在碱金属阳离子之间的空隙中, 变成了高压电子而导致的^[15-17]。这项研究也开拓了凝聚态物质金属-非金属性质过渡的先河。正因如此, 碱金属负离子盐的光、电、磁等性能, 就有可能在制备先进无机功能材料, 开拓其新兴应用领域大显身手。而也正因如此, 百年之久的碱金属只能形成阳离子的教条被粉碎了。然而, 在过往的课堂教学中, 碱金属几乎一半的性质特征都被忽略了。

1.2 内容陈旧基本知识缺失完整性

2009年, 申泮文院士指出^[18]: 大一化学课程中讲授的元素化学, 只是一部分“启蒙化学知识”, 不能代表无机化学。而大多数学生以后却再无机会专门学习元素化学了。今年, 郑兰荪院士写道^[4]: 在本科教学中, 各高校开设的无机化学基础课程及所授的无机化学基础知识也相应偏少。尽管“无机化学”课程是一年的课程, 但为了实现与中学学习的化学知识的衔接, “无机化学(上)”(又称普通化学、化学概论等)所教授的内容主要是物理化学(包括结构化学)及分析化学的基础知识。“无机化学(下)”(又称元素化学)才开始实际教授无机化学的专业知识, 在各大院校为3个学分, 内容仅限于各种化学元素的介绍(包括配位化学的一些基础知识), 这些内容显然不足以涵盖化学类专业学生所必须掌握的无机化学相关知识。

现行教学模块碱金属单质、化合物、盐类中, 内容太“碎、浅、薄”, 能少则少, 千篇一律, 创新和发展的内容较少。这也使教师备课简单, 课程设计完全满足不了对无机化学专业学生“实、

深、厚”的要求，质量完全达不到《专业规范》^[19]和《质量国家标准》^[20]的要求，学生学习起来也没有动力。主要存在问题有，碱金属元素的讲授，只是介绍规律性，没有介绍碱金属元素在自然界的存在、发现、命名、同位素与核性质等内容；没有介绍从矿物单质提取和纯化碱金属的细节；碱金属化合物只有个别化合物的介绍，重要系列化合物内容缺失，不系统不完整(即我们所指基本知识：单质、简单二元化合物、复杂化合物包括重要盐类和配合物)；没有充分应用上册学习的无机化学理论知识指导学习碱金属元素部分；没有及时更新碱金属元素部分最新的发展，知识素材和资料不足以支撑无机化学相关知识。例如，碱金属的钠、钾、铷和铯不能生成其相应的金属碳化物，却能生成与碳化物相似的三类化合物：① 碱金属-石墨二取代乙炔化合物(alkali metal acetylene compounds)；② 叠层化合物(intercalation compounds)；③ 碱金属-富勒烯配合物(alkali metal fullerene complex)。这些内容在课堂教学中并未详细介绍，相应的也造成了学生知识信息量和认知思维的缺失。

1.3 缺少专业与思政同向同行的描述和引导

(1) 在课程设置上，碱金属元素及其化合物的提取、制备化学、工业应用内容，没有关联涉及到溶液化学、计算化学、相图、极端条件下的最新技术应用，没有更好地体现化学基本原理、概念、知识与实际社会应用之间的联系。在能力培养上，未能立足中国实践、国情民情、紧跟时代步伐、服务国家等需求，强化“学以致用”的理念。这也不利于对学生判断复杂问题和解决问题能力的培养，不利于碱金属元素知识在相应交叉学科(材料、环境、能源、生物)中最新应用的认知。例如碱金属及其化合物在先进电池中电极和电解质的应用，在以往的课堂设置中很少介绍，这也使无机专业的毕业生到企业、工厂或研究所需要重新学习生产设备和工艺流程。

(2) 课程设计挖掘“专业与思政同向同行”不够明显，没有很好利用重点事件的背景分析对学生进行素质培养。例如，碱金属配位化学的真正迅猛发展始于20世纪60年代。Poonia和Bajaj^[21]认为之所以这么晚被研究，主要是由于以下三个方面的原因：① 碱金属元素化学被认为过于简单且只能借助离子模型方可辨别；② 与其他广泛研究的过渡金属离子相比，碱金属元素配位性能被认为太弱，且缺乏有效的检测手段来分辨碱金属、碱土金属离子与配体间较弱的相互作用；③ 人们普遍认为没有必要深入进行对于碱金属的配位化学的研究，也因此，还没有引起足够重视新发现的碱金属配位作用。而恰恰相反的是，碱金属配位化学在交叉学科——生物无机化学中，碱金属配位化学起到了至关重要的作用。碱金属离子配位的大环配体、富勒烯配体、有机酸类配体、唑类配合物形成的配合物，内容丰富，可通过调节大环配体的性质实现其与碱金属形成配合物的精确控制，可广泛应用在催化、药物设计等先进功能材料领域。例如，碱金属大环配合物有机液膜作为生物体内离子传输^[22,23]、富勒烯掺杂碱金属配合物在半导体、导体和超导体等方面的应用^[24,25]及储氢性能^[26]、唑类配合物在化学化工、有机合成、生物医药、配位化学、材料化学和文物保护等领域的应用。碱金属化学的发展史中，有着历代伟大化学家的无私贡献、科学精神以及正确的人生价值观，可以很好地引导学生树立正确的价值观。而正确认识碱金属配位化学地位从“没有必要深入研究”到“至关重要作用”的演变过程，也可以让学生体会到科学研究的艰辛和曲折的必经之路，最终在学生心中形成正确的社会主义核心价值观。此外，引入最新材料领域的发展，介绍碱金属配位化学所扮演的重要角色，启发学生的创造力和改造力，加强学生的主观世界改造观。

提到碱金属元素，全球锂资源丰富，但储量分布不均。全球锂资源主要分布在南美、美国、澳大利亚和中国等地，我国仅占比在10%以下。中国锂资源以盐湖为主，而我国又是全球最大的锂资源消费和贸易国。为解决目前锂资源不足的问题，近年来，我国盐湖锂资源开发利用技术大力发展，已逐步规模化应用^[27-31]。宣言这类卓越的研究成果可坚定学生面向经济主战场、面向国家重大需求而学习的信念，培养学生国家利益至上的思想。此外，碱金属化学中，我国的化学工程专家侯德榜先生于1943年首次发明了“侯氏制碱法”，他使合成氨和制碱两大生产体系有机地结合起来，在人类化学工业史上写下了光辉的一页，在学术界也获得了相当高的评价^[32,33]。在该部分介绍中，

凸显侯德榜先生的爱国精神、为了民族的伟大复兴，刻苦钻研的科学品质，可很好地体现专业与思政同向同行的教育价值，培养学生钻研科学的热情和为国争光的荣誉感。在尚没有提出绿色化学概念的时代背景下，侯德榜制碱法却充满了绿色化学思想，这也体现了绿色化学的原则，符合绿色化学“能量使用应最小”和“原子经济”的原则，是经得起历史考验的绿色化工。这些都是学习马克思主义的辩证法、唯物主义、哲学的好资料，对培养学生尊重科学、实事求是的科学作风、研究方法、科学思路，启发学生的创新意识大有好处。

因此，在以往“碱金属元素”课程设计的基础上，紧跟时代步伐，创新课程设置，加强挖掘新的“专业与思政同向同行”课程设计素材，可以更好地发展中国的无机化学教学模式，更好地培养具有正确价值观、世界观、专业知识储备的学生。

2 重构“碱金属元素”教学设计的想法和做法

2.1 教学设计的想法

基于目前碱金属元素教学中存在的问题，我们以张青莲和申泮文主编的《无机化学丛书》榜样，2019年开始了《无机化学探究式教学丛书》的编写(目前科学出版社已正式出版11本分册，在审即将出版11本分册)^[34]。在重构“基础无机化学”教学设计时，我们提出了“突出专业-能力-素质融合是升华无机化学课程设计的核心”的观点^[35]，在该方面发表相关课程设计教学论文10余篇。那么更细化的，如何有效进行“碱金属元素”内容重构，做到“知识-能力-素质”的有机融合呢？这主要从注重基本知识的完整性、科学性和应用性做起。新组建的教学内容模块具有先进性和合理性，内容整体构架具有学科发展的融合性，凸显出专业与思政同向同行的教育功能性，可以保障课程内容的“高阶性、创新性和挑战度”，最终形成具有中国特色，世界水平的课程设计特色。并且新组建的教学内容服从教育部提出“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”^[36]的宗旨。

2.2 教学设计的做法

(1) 首先，认真学习2018年以来教育部的指导意见，明确教学改革的风向标；认真学习教育部化学指导委员会的《专业规范》和《质量国家标准》的要求；认真学习厦门大学长期对无机化学教学改革的宝贵经验^[37-42]。以突出创新思维和科学研究方法为导向，引导视角转变。

(2) 针对过往“碱金属元素”课程设计的不足，以戴安邦先生提出的^[43]“好人才必具有扎实的知识，逻辑思维力和较强的观测力、查阅力、记忆力、想象力和表达力，以及崇实、贵确、求真、创新、存疑的精神和有高尚理想、热爱专业、勤奋刻苦，锲而不舍、爱集体、重协作的品德”为指导思想，坚持课程设计的“两性一度”和“知识-能力-素质的有机融合”原则。

(3) 通过大量文献查阅和分析，对碱金属元素的内容模块进行了重组。确定了“碱金属元素”教学内容应包括5个模块(表1)，应在如下知识点上深入研究：① 碱金属阴离子配合物是最强的还原剂；② 我国盐湖资源丰富，特别是锂的提取；③ 碱金属配合物的重要性；④ 碱金属及其化合物在先进功能材料中的应用；⑤ 碱金属元素的生理作用。正如郑兰荪院士在《无机化学探究式教学丛书》中写的序说的：“教师授课在保证学生掌握基本知识点的前提下，还应当让学生了解国际学科发展与前沿、了解国家相关领域和行业的发展与知识需求，了解中国科学工作者对此所作的贡献，启发学生的创新思维与批判性思维，促进学生的科学素养发展”。在该方面的研究中，已写出了多篇教学论文^[44]，而这正式碱金属元素教学内容重组的基础。

3 结语

(1) 本文基于“碱金属元素”的教学如何做到“实、深、厚”的问题，在教学内容上进行了重构。其中比较大的改动为：① 增加了“碱金属可以形成负离子”的知识，强调碱金属结构的辩证看法；② 扩充了碱金属单质的制备、纯化和其单质的应用，强调了“学以致用”的做法；③ 增加了碱金属元素的生理作用，增强对元素化学的全面学习。这些做法提升了内容的“两性一度”。实践证

明，我们在“碱金属元素”教学内容改革中的做法是有效的，新内容的重构，有利于教师备课资料的选择和设计，有利于学生的学习兴趣提高和自主学习。

表1 “碱金属元素”教学模块内容

模块单元	内容及核心点	讲授方式	内容扩充
1. 碱金属元素概论	内容：① 碱金属元素；② 碱金属元素的发现和命名；③ 碱金属元素的基本性质；④ 碱金属元素的同位素与核性质 核心点：① 论证碱金属可以形成负离子；② 系统介绍碱金属元素的发现和命名、物理性质和化学性质、同位素与核性质；③ 强调共性和个性；④ 设计born-haber循环计算说明碱金属性质的规律性 历史事件回顾 碱金属阴离子简介	线上线下结合，以提供事实为主；强调碱金属阴离子；重点讲述born-haber循环计算对碱金属性质规律性的解释 专题讲座	① 增加元素发现和命名、同位素与核性质内容；② 开辟一个元素简介模板 碱金属阴离子形成的简史；发展给予我们的科研创新思路、创新的研究方法的启示；未来可能的发展
2. 碱金属单质	内容：① 碱金属单质的基本性质；② 碱金属单质的制备和纯化；③ 碱金属单质的应用 核心点：① 从不同物理量角度解释化学性质的规律性；② 介绍碱金属与其他各组元素的作用；③ 对角线规律与锂的反常性质；④ 总结归纳碱金属结构与其性能之间的构效关系，解释其反常的原因；⑤ 介绍矿物提取单质及纯化制备；⑥ 碱金属的应用 历史事件回顾 盐湖提锂研究简介	详略适当讲授；强调从矿物提取单质的原理、反应、工艺；从结构-性能的内在关系讲述知识的应用 专题讲座	① 矿石的火法和湿法冶炼；② 单质的纯化原理、工艺；③ 元素在新型功能材料中的应用；④ 引入最新研究成果和最新前沿介绍 ① 盐湖碱金属的提取及回收；② 突出介绍我国是锂资源大国，资源丰富、集中程度高，宣扬我国盐湖锂资源开发利用和技术进步的规模化应用，卓越的研究成果可坚定学生面向经济主战场、面向国家重大需求而学习的信念
3. 碱金属简单化合物	内容：① 含氧化物(氧化物和氢氧化物)；② 氢化物；③ 卤化物和氰化物；④ 硫化物、氮化物和碳化物；⑤ 金属间化合物 核心点：① 系统介绍各类化合物的性质、结构、制备、用途；② 强调制备中溶液化学、计算化学、相图、极端条件下技术的应用	详略适当讲授；强调构效关系；注重理论知识指导元素化学学习；知识和技术的应用	① 尽量绘制化合物性质数据表、相图，力图从热力学对问题的解释；② 引入最新研究成果，最新前沿介绍以及重点化合物在新型功能材料中应用介绍；③ 学习马克思主义的辩证法、唯物主义、哲学的好资料，对培养学生尊重科学、实事求是的科学作风、科学研究方法、思路，启发学生的创新意识，践行专业与思政同向同行

(待续)

(续表1)

模块单元	内容及核心点	讲授方式	内容扩充
4. 碱金属复杂化合物	<p>内容：① 碱金属盐溶解性的热力学解释(硫酸盐、硝酸盐、碳酸盐、磷酸盐和复盐)；② 重要配位化合物(水合离子是配合物，与大环配体、富勒烯、有机酸类、唑类形成的未定配合物)；③ 碱金属的金属有机化合物简介</p> <p>核心点：① 强调化合物基本面的完整性；② 注重理论知识指导元素化学学习；③ 扩充配合物知识的广度和深度</p> <p>历史事件回顾 碳酸钠工业制法的三部曲</p>	<p>前沿知识介绍</p> <p>专题讲座</p>	<p>① 尽量绘制化合物性质数据表、图，力图从热力学对问题的解释；② 扩充配合物知识的广度和深度；③ 突出配合物及金属有机化合物在先进功能材料中应用</p> <p>① 详讲“化工之母”工业制造的来龙去脉，突出原理和反应；② 突出碳酸钠工业制法的教育价值，树立科学、客观的辩证唯物主义世界观；③ 通过美誉世界的“侯氏制碱法”学习，凸显侯德榜先生的爱国精神、为了民族的伟大复兴，刻苦钻研的科学品质，绿色化学思想</p>
5. 碱金属元素的生理作用	<p>内容：① 锂的抗发炎及神经保护和治疗；② 钠离子通道；③ 钾是人体和植物的必需营养素；④ 铷对躁郁症和抑郁症的影响；⑤ 较小剂量铯可能导致不育或者癌症</p> <p>核心点：① 强调元素生物功能的分类以及与生物无机化学的关系；② 注重元素生理作用的应用</p> <p>历史事件回顾 锂的生理作用和医疗用途——小粒子大作用</p>	<p>自学为主</p> <p>专题讲座</p>	<p>① 碱金属元素的生物必需性：治疗作用及毒性；② 由此引起的配合物概念扩充</p> <p>① 锂在外用治疗皮炎和内用神经保护和治疗等医疗临床应用及相关研究进展；② 学习现代精神病药理时代的鼻祖凯德(J. Cade, 1912–1980)为科学实验的献身精神，鼓励年轻学子树立正确的“三观”，为中华崛起而学习</p>
6. 碱金属元素在新能源领域的应用	<p>内容：引导学生查阅资料和最新文献，总结归纳目前碱金属元素在新能源领域的具体应用。分应用领域综述，并做成报告，在课堂中讨论</p> <p>核心点：① 碱金属元素在热电转化领域的应用，明确碱金属元素特征性质；② 碱金属元素在金属电池负极的应用，主要包括锂金属电池和钠金属电池，重点关注目前的应用前景；</p>	<p>反转课堂</p>	<p>以图、文、视频等方式介绍目前碱金属元素在有机固态电池、锂离子电池、复合固态电池、聚阴离子固态电池、超薄固态电池中的发展和现状。介绍目前碱金属电池最大的挑战——制备全固态锂电池的技术难点及原因，回归教学，进一步强调碱金属元素的结构特点和性质，加深学生的学习记忆</p>

(待续)

(续表1)

模块单元	内容及核心点	讲授方式	内容扩充
6. 碱金属元素在新能源领域的应 用	③ 碱金属元素在生物质能源领域的应用, 可以有效缓解化石能源危机, 为“碳达峰”及“碳中和”目标做出贡献; ④ 碱金属在合金制备领域的应用, 是军工中涡轮机叶片、发动机燃烧室、火箭发动机燃烧室的制备材料之一, 也是太阳能光伏电池阵列、核反应等领域的重要材料之一	反转课堂	

(2) 在所有教学内容中, 注意到合理引用化学史、化学领域的新进展和新成就, 以及化学在高新技术领域的重大应用、重要贡献。例如, 对碱金属配合物的叙述, 首次全面展示了包括水合离子配合物, 与大环配体、富勒烯、有机酸类、唑类形成的重要配合物以及碱金属的金属有机化合物简介。

(3) 我们提倡要“通过基础课培养学生的科研思维”^[45], 以突出创新思维形成为主; 学习的结果是获取丰富的专业知识, 在社会上有能立脚站稳的能力以及为国服务的家国情怀。力争做到“知识-能力-素质”的有机融合。

参 考 文 献

- [1] 陈文. 教育界, **2020**, No. 6, 15.
- [2] 魏明灯, 魏巧华. 大学化学, **2021**, 36 (6), 2008073.
- [3] 杜意恩, 郭少华, 路彬. 化学工程与装备, **2022**, No. 12, 350.
- [4] 高胜利. 非金属元素同素异形体综论. 北京: 科学出版社, 2023.
- [5] DukelSkii, V. M.; Zandberg, E.Y.; Iionov, N. I. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR* **1948**, 3, 232.
- [6] Patterson, T. A.; Hotop, H.; Kasdan, A.; Norcross, D. W.; Lineberger, W. C. *Phys. Rev. Lett.* **1974**, 32, 189.
- [7] Golden, S.; Gurrman, C.; Tuttle, T. R. *J. Am. Chem. Soc.* **1965**, 87, 135.
- [8] Golden, S.; Gutrman, C.; Tuttle, T. R. *J. Chem. Phys.* **1966**, 44, 3791.
- [9] Moralon, S.; Golden, S.; Orrolenghi, M. *Phys. Chem.* **1969**, 73, 3098.
- [10] Dye, J. L.; Ceraso, J. M.; Lok, M. T.; Barnett, B. L.; Tehan, F. J. *J. Am. Chem. Soc.* **1974**, 96 (2), 608.
- [11] Tehan, F. J.; Bornetr, B. L.; Dye, J. L. *J. Am. Chem. Soc.* **1974**, 96 (23), 7203.
- [12] Dye, J. L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **1979**, 18, 587.
- [13] Dye, J. L.; Redko, M. Y.; Huang, R. H.; Jackson, J. E. *Adv. Inorg. Chem.* **2006**, 59, 205.
- [14] Dye, J. L. *Philos. Trans. A* **2015**, 373 (2037), 1.
- [15] Ma, Y.; Eremets, M.; Oganov, A. R.; Xie, Y.; Trojan, I.; Medvedev, S.; Lyakhov, A. O.; Valle, M.; Prakapenka, V. *Nature* **2009**, 458, 182.
- [16] Matsuoka, T.; Shimizu, K. *Nature* **2009**, 458, 186.
- [17] Ashcroft, N. M. *Nature* **2009**, 458, 158.
- [18] 申泮文. 大学化学, **2009**, 24 (2), 7.
- [19] 教育部高等学校化学类教学指导委员会. 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, 2011.
- [20] 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(上下册). 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [21] Poonia, N. S.; Bajaj, A. V. *Chem. Rev.* **1979**, 79 (5), 389.
- [22] Izatt, R. M.; Lind, H. G. C.; Bruening, R. L.; Bradshaw, J. S. *Pure & Appl. Chem.* **1986**, 58, 1453.
- [23] Fyles, T. M. *J. Membr. Sci.* **1985**, 24, 229.

- [24] Chen, G.; Guo, Y.; Karasawa, N.; Goddard, W. A. *Phys. Rev. B* **1993**, *48*, 13959.
- [25] Haddon, R. C.; Hebard, A. F.; Rosseinsky, M. J. *Nature* **1991**, *350*, 320.
- [26] Maurov, P.; Gaboardi, M.; Pontiroli, D. *J. Phys. Chem. C* **2015**, *119* (4), 1714.
- [27] 蒋晨啸, 陈秉伦, 张东钰. 化工学报, **2022**, *73* (2), 481.
- [28] 王琪, 赵有璟, 刘洋. 化工学报, **2021**, *72* (6), 2095.
- [29] 葛涛, 徐亮, 孟金伟. 有色金属工程, **2021**, *11* (2), 55.
- [30] 王生彪, 王世蛟. 化工管理, **2020**, No. 10, 139.
- [31] 张丽芬, 邢学永, 王文娟. 矿冶工程, **2020**, *40* (5), 94.
- [32] 魏云昌. 纯碱及苛化烧碱法. 北京: 中国工业出版社, 1964: 85–104.
- [33] 陈歆文, 李祉川. 中国化学工业的先锋: 范旭东侯德榜传. 天津: 南开大学出版社, 2021.
- [34] 薛东, 高玲香, 胡满成. 大学化学, **2022**, *37* (11), 2111044.
- [35] 翟全国, 薛东, 魏灵灵. 大学化学, **2022**, *37* (11), 2208119.
- [36] 朱亚先, 林新萍, 周立亚. 大学化学, **2016**, *31* (5), 8.
- [37] 朱亚先, 林新萍, 周立亚. 大学化学, **2016**, *31* (6), 7.
- [38] 朱亚先, 林新萍, 周立亚. 大学化学, **2016**, *31* (7), 14.
- [39] 朱亚先, 周立亚, 匡勤. 大学化学, **2022**, *37* (11), 2205037.
- [40] 朱亚先, 黄荣彬, 林丽榕. 中国大学教学, **2011**, No. 10, 36.
- [41] 朱亚先, 洪炜, 夏海平. 大学化学, **2019**, *34* (10), 8.
- [42] 朱亚先, 匡勤, 汪骋. 大学化学, **2020**, *35* (8), 1.
- [43] 戴安邦. 大学化学, **1989**, *4* (1), 1.
- [44] 张树永, 宋其圣. 大学化学, **2005**, *20* (4), 14.
- [45] 杨奇, 陈三平, 谢钢. 中国大学教学, **2016**, No. 4, 31.