

高分子化学创新教学与一流课程建设

郭霖*

青岛大学材料科学与工程学院, 山东 青岛 266071

摘要: 基于学情分析与独立思考, 根据提高人才培养质量需要, 在“以学生为中心、注重学生兴趣与能力, 特别是可持续发展能力及创新能力培养”的教学思想指导下, 针对高分子化学课程教学过程中的一些重点、难点、“痛点”问题, 以及学生学习过程存在的一些短板问题, 包括高分子化学课程特有的问题, 所有工科专业课程共有的问题, 以及所有大学课程都有的问题等, 从“革新思想、优化内容、改进方法、更新手段、加强综合、增进渗透”等方面系统性地开展创新教学实践, 取得了一系列成果, 并将课程建设成为省级一流课程。

关键词: 高分子化学; 创新教学; 一流课程; 课程建设; 课程思政; 教学理念; 元认知

中图分类号: G64; O63

Innovative Teaching and First-Class Course Construction of Polymer Chemistry

Lin Guo *

College of Materials Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong Province, China.

Abstract: A series of innovative teaching practice are carried out from the aspects of thought updating, content optimizing, method improving, means updating, integration strengthening and penetration enhancing, under the guidance of the teaching thoughts of “student-centered, and focusing on the cultivation of students’ interest and ability, especially the ability of sustainable development and innovation”. The practice aims at the key points and difficult problems in the teaching and the weaknesses in the learning of polymer chemistry, based on the analysis of students’ learning situation. Good teaching results and a series of innovative teaching accomplishment have been achieved, and the course has been constructed into a provincial first-class course.

Key Words: Polymer chemistry; Innovative teaching; First-class course; Curriculum construction; Course ideology and politics; Teaching idea; Metacognition

高分子化学是高分子材料与工程、复合材料与工程等工科专业的专业核心课, 其教学质量对这些专业的人才培养质量有重要影响。相关教学研究持续受到重视^[1-20]。

我们自20世纪90年代初开始, 在学校支持下, 开展高分子化学课程教学改革与创新。

鉴于当时国内外化学类课程教学中日渐兴起的“优化内容、改进方法、更新手段、加强综合、增进渗透”的改革趋势, 我们确定了“围绕推进素质教育, 树立新的教学理念, 探索、建立并完善

收稿: 2021-03-11; 录用: 2021-05-17; 网络发表: 2021-05-19

*通讯作者, Email: guolin@qdu.edu.cn

基金资助: 山东省普通高等教育教学改革试点课程“高分子化学”项目(鲁教高字[1999]27号); 山东省省级精品课程“高分子化学”项目(150410030); 山东省一流课程“高分子化学”暨青岛大学“以学为中心”课程“高分子化学”项目(RC1900004947); 全国高等院校化工类及相关专业数字化教学项目(高分子化学在线解题软件子项目); 青岛大学第三批课程思政示范项目(KCSZ2021116); 青岛大学研究生教育质量提升计划“计算机在化学中的应用”项目(RC19000016633)

新的内容体系、新的教学方法,全面采用多媒体计算机辅助教学(MCAI)这一现代化的教学手段,提高教学效率,并注重在传授知识的同时,培养学生综合运用所学知识(包括相关课程知识)的意识及能力,切实提高学生的专业素质”的改革总思路,1999年明确树立了“大纲新、教材新、内容新、体系新、方法新、手段新”的“六新”改革目标,2000年明确提出了“以学生为中心、注重学生兴趣与能力,特别是可持续发展能力及创新能力培养”的教学思想、教学理念,从“革新思想、优化内容、改进方法、更新手段、加强综合、增进渗透”等方面持续进行改革与创新,取得了良好的教学效果及一系列教学研究成果^[21-35],受到学生普遍欢迎,并得到专家肯定,课程先后入选山东省普通高等学校教学改革试点课程(1999年,首批)、山东省省级精品课程(2004年,青岛大学首批)、山东省省级一流课程(2019年,首批),前期成果“高分子化学教学改革与创新”(含课程思政创新点“结合学科特点、学科发展及时事事件,加强对学生创新意识、环保意识、科学精神、科学态度及社会责任感的培养”)获2001年山东省省级教学成果一等奖,并被山东省教育厅推荐参评当年的国家级教学成果奖,为我校相关专业提高人才培养质量及办学水平、申报博士点做出了突出贡献,也为我校相关专业学生深造率由20世纪90年代初的不足5%逐步提高并稳定在50%–60%提供了有力支撑。

1 高分子化学教学中的重点、难点、“痛点”——问题的提出

这些问题,有些是高分子化学课程特有的,有些是所有工科类专业的课程共有的,还有一些则是所有大学课程都有的。

1.1 高分子化学课程教学中特有的重点、难点、“痛点”问题

高分子化学是研究高分子或聚合物的合成及其化学反应的一门科学^[36-38]。重点围绕“一个概念”(高分子概念)基础上的“两类反应”(聚合反应以及聚合物的化学反应)的“三个方面”(反应物、产物、反应过程,或,反应的始态、终态和过程)展开。

具体包括高分子化学的基本概念,聚合反应的主要类型、机理及其应用,影响聚合物结构、分子量、聚合反应速率、共聚物组成及体型缩聚凝胶点的主要因素,控制聚合物结构、分子量、聚合反应速率、共聚物组成及体型缩聚凝胶点的原理、方法及相关计算,重要的聚合物反应、聚合实施方法及聚合物品种等。

由于聚合反应是微观的随机过程,聚合物合成设计又常常需要逆向思维,还有小分子有机反应中通常并不存在的序列结构、分子量、分子量分布,乃至组成、组成分布等问题,抽象而且复杂,进行定量处理时往往需要基于合理假设、建立近似模型,对很多问题的理解,需要用到有机化学、物理化学,甚至分析化学、无机化学、高等数学、大学物理等许多先修课程中学到的知识,加之有些问题,甚至是一些基本的、重要的问题,不同教科书中还可能有不同的表述,甚至不同的观点,有些表述和观点甚至还是过时的、乃至错误的,这些都可能造成教师教学、学生学习过程中出现困难,并因而成为教与学中的难点、“痛点”(详见表1)。

如何化解这些问题,减少学生学习过程中可能出现的困难,成为摆在每位高分子化学课程任课教师面前的重要问题。

1.2 工科专业课程教学中普遍存在并需要解决的问题

工程教育专业认证对课程教学提出了新要求,也带来了新问题。

为工科专业学生所开设课程的教学及课程目标中如何体现工程教育专业认证所要求的“以学生为中心、产出导向(OBE)、持续改进”理念^[39],教学过程中如何实现工程教育专业认证指标体系中所要求的“培养学生的……协作精神以及综合应用所学知识解决实际问题的能力”^[39]等指标要求,是工科类专业课程教学需要解决的共性问题,是摆在所有工科专业任课教师面前的共同任务,当然也是作为高分子材料与工程以及复合材料与工程两专业共同之专业核心课程高分子化学的任课教师必须认真面对和解决的重要问题(详见表1)。

1.3 所有高等教育课程都应该解决好的问题

此类问题包括课程思政,开展团队(小班化)教学时的平行班教学质量提高与控制问题,以及学生学习过程中表现出的短板等。详见表1。

表1 高分子化学教学中的部分难点、“痛点”及其解决思路、解决方法^[21-35]

难点、“痛点”	原因分析	解决思路	解决方法与途径
自由基聚合的机理; 共聚合类型、共聚物类型及共聚物组成曲线随竞聚率的变化, 以及与竞聚率、单体转化率的关系; 缩聚中聚合物拓扑结构 ^[40] 、聚合物聚合度以及是否具有凝胶点, 与配方(单体种类及相对量)的关系等	微观、抽象、随机、复杂、综合, 存在序列结构、分子量、分子量分布, 乃至组成、组成分布问题, 并且综合用到了有机化学(反应及机理)、物理化学(动力学), 概率论的相关知识	通过计算机辅助降低问题的学习难度及理解难度	可视化(借助Director、Gaussian软件、高分子化学在线解题软件)、工具化(借助高分子化学MCAI软件, 高分子化学在线解题软件), 建立典型体系, 直接基于普遍情况推导出普适通式, 并在此过程中自然引入相关参数及其定义 对于自由基聚合及线型缩聚, 在讲授其聚合度控制及相关计算时, 采取了在讲清不同体系聚合度概念的基础上, 建立典型体系、导出通式 ^[22] 并辅以图解的方法 ^[24] , 达到了事半功倍的教学效果, 其中, 对于线型缩聚, 还在推导Carothers方程的过程中自然地引入了摩尔比 r (当量系数)的新定义 ^[21] , 这不仅使摩尔比 r 的定义更易被学生所理解, 也大大拓宽了Carothers方程的适用范围; 讲授线型缩聚物分子量分布时, 则运用了自主开发的MCAI课件, 直观、高效、准确 对于自由基共聚, 在讲授共聚物组成及其相关计算时, 一方面, 采取了由微观(序列结构)到宏观(组成), 并辅以图解的方法 ^[23] , 使同学们能在掌握相关计算公式的同时理解影响共聚物组成的各种因素, 另一方面, 通过开发并运用相应的MCAI课件、解题软件, 进一步起到了直观、高效、准确的效果 对于体型缩聚, 在讲授Carothers法预测凝胶点时, 采取了在推导公式过程中自然引入平均官能度普适定义的方法 ^[22] , 不仅避免了教科书中的需视情况对其分类定义的问题, 也使其定义更易被学生所理解
缩聚反应中的官能团等活性假设; 自由基聚合中的自由基等活性假设、长分子链假设以及稳态假设; 共聚合中的无前末端效应、活性中心等活性、长分子链、无解聚假设等; 聚合物合成设计	定量处理相关问题时需要基于合理假设, 建立近似模型, 并且需要综合运用有机化学(机理), 物理化学(动力学)的相关知识	知识的迁移及综合运用	在讲清概念及全面、透彻分析体系、理解问题的基础上, 启发、引导学生思考, 并运用相关课程所学知识, 基于典型体系, 建立模型并推导普适公式; 借用有机化学中学到的切断法, 把聚合物合成设计问题转变为有机化学问题

(待续)

(续表1)

难点、“痛点”	原因分析	解决思路	解决方法与途径
对于各种聚合反应以及聚合物的化学反应的理解, 包括, 自由基聚合中链增长反应的加成方式及所得聚合物的序列结构, 烯丙基单体的自阻聚, 单体及自由基的活性; 阴离子聚合中引发剂的引发活性以及引发剂与单体的匹配关系、通过活性阴离子聚合合成嵌段共聚物时的加料顺序。阳离子聚合中易发生链转移及异构化聚合; 三聚甲醛均聚得到的聚甲醛热稳定性较差以及如何改善等等	需要综合运用有机化学, 乃至物理化学、无机化学的相关知识	知识的迁移及综合运用	在讲清概念及全面、透彻分析体系、理解问题的基础上, 启发、引导学生思考, 并运用相关课程所学知识, 准确、全面理解相关问题 讲清、讲透、讲对
聚合反应的热力学、动力学问题的理解; 平衡缩聚中化学平衡的影响	需要综合运用物理化学的相关知识	问题转换及知识迁移	将聚合反应视作化学反应的一种, 将高分子化学(中的聚合反应相关的物理化学)问题“脱壳”并转换成相应的物理化学问题
PVA中H-H结构(头-头结构)含量的测定、光引发速率方程的建立, 偶氮类及过氧类引发剂分解速率的测定等	需要综合运用有机化学及分析化学的相关知识	问题转换、知识的迁移及综合运用	将所涉及的反应转换为相应的有机化学反应(邻二醇所特有的、可定量进行的氧化反应), 将相关的测定转换成普通的分析化学测定(氧化还原滴定)问题
Lewis酸碱理论、水溶性氧化还原引发体系及其引发反应, 配位聚合中活性中心结构及配位问题、定向问题的理解等	需要综合运用无机化学的相关知识	问题转换及知识的综合运用	将问题转换成无机化学问题, 并调用无机化学中学到的相关知识进行理解
光引发特点的理解、辐射引发与光引发的特点差异等	需要综合运用大学物理的相关知识	改变思考问题的角度, 进行问题转换或“脱壳”	将问题转换成相应的物理问题
单体/反应物质浓度或单体转化率随时间的变化、聚合速率随时间的变化、聚合速率随时间的变化率, 稳态假设成立时(聚合初期或未发生自动加速之前)自由基聚合速率方程的积分式, 或单体转化率与聚合时间的关系式, 线性缩聚中聚合物数均聚合度随聚合时间的变化率, 共聚物的序列分布等	需要综合运用高等数学(原函数、一阶导、二阶导, 微积分, 概率论)的相关知识	进行问题转换或“脱壳”	将问题抽象为数学问题, 然后从数学的角度解决或帮助理解

(待续)

(续表1)

难点、“痛点”	原因分析	解决思路	解决方法与途径
不存在链转移的自由基乳液聚合中, 聚合物数均聚合度的计算公式到底应该是 $r_i = \frac{\rho}{N}$ 还是 $r_i = \frac{\rho}{\bar{n}N}$, 以及如何理解的问题	不同教科书中可能有不同的表述, 甚至不同的观点	进行问题转换, 或抽象为数学问题	启发、引导学生将问题抽象为数学问题, 并尝试从数学的角度理解、推导出正确的计算公式和进一步据此做出正确判断
阴离子聚合中所谓的“单体的 pK_a ”到底应该是什么的问题	教科书中表述模糊或不够准确, 甚至错误	将问题转换为有机化学问题, 调用相关的有机化学、无机化学的知识来理解	启发、引导学生通过独立思考, 找到解决问题的思路, 并借助已有的有机化学知识, 基于严密的逻辑, 进行正确理解, 并自主得到答案
“ $r_1 > 1, r_2 > 1$ ”时发生的是否就是嵌段共聚(“嵌段”共聚), 得到的是否就是嵌段共聚物	同上	基于所学概念及严密的逻辑进行推演, 找到验证的角度及指标, 而在高分子化学在线解题软件支撑下进行探究, 得出正确结论	启发、引导学生通过独立思考, 找到解决问题的思路及方法, 并在高分子化学解题软件的支撑下, 进行探究, 自主找到答案, 做出判断
工程教育专业认证培养目标要求中的非技术指标的实现	如何找到合适的应用例、工具; 任务布置及完成、评价方式	将借助计算机处理实验数据引入高分子化学教学, 将实践性作业、综合性作业、小组作业、探究性作业、跨学科作业、分层次作业、弹性作业、个性化作业、合作学习、课堂汇报交流(翻转课堂)、自评互评引入高分子化学教学, 培养学生的合作意识、合作精神、合作能力, 沟通表达能力, 以及评价能力问题的意识及能力	通过自由基聚合(以及缩聚、共聚合的)自编习题及布置小组作业 ^[31] , 引导学生在高分子化学在线解题软件的支撑下, 开展独立与合作相结合的探究性学习; 借助Origin软件 ^[32,33] , 通过小组合作学习(教中学, 做中学、以及学中做), 完成高分子化学相关实验数据的处理及成果交流汇报与课堂讲评(翻转课堂), 并在此基础上进行反思、完成学习成果的改进、学习过程的迭代(加强元认知的认知并提高元认知能力), 以及自评互评
课程思政	如何找到合适的切入点(时机、内容、结合点、话题或案例), 将课程思政与课程内容及课程特点、热点事件、热点话题等自然融合, 使之真正有用、有效, 并能避免刻意及可能由此引起的逆反	结合课程特点引发学生的哲学思考, 培养学生的辩证思维, 并加深对所学专业问题的理解	把高分子化学在的问题变成哲学问题, 或者将高分子化学中遇到的具体问题转换成哲学中的应用例或可借助哲学进行哲学思考的应用例
团队教学时的平行班教学质量提升与控制问题	承担不同平行班教学的团队成员的专业背景、教学经验、教学投入、教学方法、对现代教学技术的熟悉及掌握程度、对教学的追求, 乃至教学能力、对课程内容的熟悉、理解程度、对课程相关学科知识的熟悉程度或知识面、阅历等可能存在差异	想办法采取措施做到“同步、同质、同效”。通过必要和有效的措施保障, 采取同步的形式, 按照同质的标准要求组织实施, 追求达到同效的目标	加强交流, 相互借鉴, 共同提高, 老教师“传帮带”+ 团队全体成员, 特别是年轻成员的“比学赶帮超”, 采取想办法提高团队全体成员的课程教学能力及教学水平的内部改进与提高方式, 争取做到优质+“同步、同质、同效”, 而非采取让学生选老师的外部促进与淘汰的方式, 使教学效果暂时不太理想的团队成员有改进、提高的机会, 并能得到改进所需的帮助

1.3.1 课程思政

课程思政是所有高等教育课程都应该解决好的问题。这份新的“必答题”，给所有课程的教学提出了新要求，也带来了新问题。

如何结合课程特点及课程具体情况、具体内容开展课程思政，将课程思政与课程内容、课程特点有机地结合起来，将课程思政自然融入课程日常教学，并且能做到既恰如其分、自然而然，又因势利导，甚至信手拈来，则是担任每一门高校课程教学的每一位高校教师都必须认真思考和努力做好的实际问题、困难问题。

1.3.2 开展团队(小班化)教学时的平行班教学质量提高与控制问题

教学团队开展(小班化的)平行班教学时，容易出现各教学班教学质量参差不齐，甚至出现明显差异的情况。我们课程教学团队在2020年开始全面开展团队小班化教学时，也遇到了这一问题。如何避免此类问题发生，保证各教学班具有比较接近、最好是实质相同且优良的教学效果，不仅是关乎人才培养质量及培养目标达成度的重要问题，也是关乎教育公平的大问题，以及许多高校教学管理部门长期致力于解决的一个问题。

如能探索出行之有效的解决思路及解决办法，不仅可以解决高分子化学课程本身的问题，也可以为其他课程的团队教学提供借鉴。

1.3.3 学生学习过程中表现出的短板

我们在长期的高分子化学教学中观察到，部分学生的学习过程中存在一些短板问题，比如，主动学习的意识与能力不足，存在“等靠要”思想，更习惯于被动接受知识，而非主动探究知识，更习惯于“被教会”而非“我学会”，元认知能力(如，学习过程中的反思及迭代能力等)、逻辑思维能力、批判性思维、创新思维、发现问题、提出问题、分析问题、解决问题的意识及能力、解决复杂专业问题的能力、知识迁移能力、知识综合运用能力、工程意识、计算思维、辩证思维、使用现代工具解决专业问题的意识及能力等相对薄弱或有待提高，等等。

如何解决好这些问题，更好地因材施教、按需施教、依标施教，提高学生综合能力及综合素质，提高人才培养质量，使学生成为达到专业培养目标要求，能满足本专业招生及用人单位需求，具有足够求学、求职竞争力的应用基础型人才，是摆在我们以及每一位任课老师面前的共同任务。

2 问题分析、解决思路与创新实践——问题的解决

2.1 学情分析与教学目标的确定

2.1.1 学情分析

我校虽为所谓“双非”学校，但我们的学生通常都是高考成绩前10%的学生，有良好的基础与能力，70%乃至90%以上打算读研，深造愿望较强，有良好的基础支撑我们开展本课程的创新教学。

2.1.2 教学目标的确定

基于学生实际、学校定位(着力培养具有“家国情怀、德才兼备”的创新型、应用型、复合型人才)、社会需求(招生及用人单位对本专业本科毕业生有巨大需求)及培养目标与培养方案，综合“意识、知识、能力”(或者可通俗地概况为“想到、知道、做到”)三个方面，我们将课程目标确定为：

使学生在修完本课程后，能比较系统地掌握高分子化学的基本概念、基本反应、基本原理与基本方法(课程目标1)；具备运用这些知识分析、解决相关问题的基本意识、基本能力，做到学以致用，学以致用，并为学习后续专业课程打下必要基础(课程目标2)。

同时，在教学过程中，结合课程特点及课程具体教学内容，培养学生的辩证思维、科学精神、环保意识、社会责任感等(课程思政目标)。

在此基础上，努力使学生还能具有相关专业敏感，并能在日常工作、学习和生活中基于所学专业知知识，通过独特的专业视角，发现和解决相关问题(拓展目标)。

并据此修订了教学大纲。

2.2 对工程教育专业认证及其标准要求的理解

基于对相关认证标准^[39]的学习,我们将其12项毕业要求的内在逻辑理解如下。

要使毕业生:

具备足够的专业相关知识(包括工程知识)(毕业要求①工程知识);能用掌握的这些知识识别、理解、分析、表达专业相关的复杂工程问题(毕业要求②问题分析);能够提出或找到解决这些问题的方案(毕业要求③设计/开发解决方案);能够据此开展研究并得出结论或解决问题(毕业要求④研究);上述过程或项目实施过程中能够选择并使用合适的现代工具或技术(毕业要求⑤使用现代工具);上述过程中还能对问题可能涉及的社会问题(毕业要求⑥工程与社会)、环境及可持续发展问题(毕业要求⑦环境与可持续发展)、法律道德乃至伦理问题,以及所应承担的社会责任等,有足够思考和正确认识,并遵守相关法规和职业规范(毕业要求⑧职业规范);上述过程及其他实践工作中,还能与团队其他成员很好地配合,扮演好恰当的角色(毕业要求⑨个人与团队),并能与人(包括团队成员、业界同行及社会公众等)进行有效的沟通和交流(毕业要求⑩沟通);在有机会对项目的管理负责时,有相关知识和能力承担(毕业要求⑪项目管理);且能够(根据需要)随时学习、更新、补充知识与技能,不断自我提高与完善,适应社会发展与进步(具备相关意识与能力)(毕业要求⑫终身学习)。

2.3 对“以学生为中心”“以学为中心”的理解

何为“以学生为中心”“以学为中心”?如何体现?我们的理解就是:进行课程教学设计、开展课程教学以及进行教学改革与创新时,一定要站在学生的角度,从学生“学”的角度、而非仅仅从老师“教”的角度进行思考,并依据有利于学生学习与成长的原则,而非仅仅有利于老师“教”的原则组织实施。

当然,既有利于学生的“学”,又有利于老师的“教”,找到“教”与“学”的最大“公约数”,应该是努力的方向、追求的目标和比较理想的情况。

2.4 对课程思政的理解和认识

课程思政,既是“老”问题,又是“新”要求,是原来的“加餐”,现在的“正餐”。

能够想到和开展课程思政,甚至主动想到和主动开展课程思政,似乎都并不难,难的是如何及时、充分而准确地挖掘出课程中蕴含的思政元素,以及如何把课程思政开展得既有声有色、引人入胜,又不着痕迹,犹如春风化雨、润物无声。

我们认为,要做好课程思政,需要“善发现、勤思考,广收集、深挖掘,巧结合、准切入,重引导、多启发,不刻意、不灌输”;需要“开拓视野,打开思路”;需要有“诗外功夫”;需要使课程思政既能深入人心,又能引发思考,既能引发共鸣,又能进行价值引领。

开展课程思政,既要因课、因时、因事,又要适时、适宜、适度,既要有广度、有高度、有深度,又要有准度、有温度、有热度,只有这样,才有可能走进学生心坎,才能真正有用、有效。要结合课程内容、学科特点,选准话题、找对角度、抓住时机,将课程思政与课程内容有机结合,自然融入课程教学,并按部就班地进行,既不能“为赋新词强说愁”,也不能“一尚难明强说三”,既要主动作为,又要把握分寸,时刻提醒自己过犹不及,避免因突兀、用力过猛、刻意为之而可能导致的逆反及副作用,甚至反作用。

这就需要任课老师在坚实的专业素养、高度的专业敏感支撑下,通过平时的“留心观察,准确洞察、及时捕捉、广泛收集、深入思考、高度凝练”这些“工夫在诗外”,换来课堂教学中的旁征博引、厚积薄发、挥洒自如和一语破的,支撑课堂上涉及相关内容及话题时,那一瞬间看似漫不经心或灵光乍现般信手拈来的一句话、一个联系或一个举例。

2.5 解决思路与流程

我们的所有创新实践都基于问题导向、适用原则以及“以学生为中心”“以学为中心”开展。

基本思路为:化解难点、提高效率,传授方法、增进意识,开拓视野、引领观念,启发思维、引导探究,激发动力、培养能力,平行同步,同质等效。

具体流程为：“发现问题，弄清原因；抓住关键，找到思路；想出办法，采取措施；解决问题，看到效果；反思迭代，改进提高”。

教学过程中，“讲清、讲透、讲对”，并力求老师的工作到位不缺位，到位不越位，避免因老师工作越位导致学生的学习主动性及能力发展受到抑制。

2.6 创新实践

我们的部分创新实践包括：

按照“讲清概念、抓住通式、突破难点、掌握关键、加强联系、通揽全面”的方针对课程内容进行了全面优化^[21-24]，创立了一套深入浅出、直观易懂、准确高效的教学方法。

教学过程中，以问题导入，从概念展开，由机理深入，最终落实到应用，做到“主线明确、脉络清晰、逻辑严密、内容充实、重点突出”。

注意加强本课程各章知识间以及与相关课程知识间的联系；注意介绍本学科的最新发展以开拓学生的视野。追求“博观”基础上的“约取”，“深入”基础上的“浅出”，以及“准确”与“严谨”前提下的“直观”与“易懂”。通过备课过程及教学内容的“博观约取、举一反三”，讲授过程中的“融会贯通、深入浅出、直观易懂”，使学生能够“开阔思路、广泛联系、触类旁通”。

将计算思维以及程序化解决问题的方法引入高分子化学教学，针对本课程中的重要计算问题，开发了高分子化学(在线)解题软件并将其运用于教学^[30]，化解教学难点，提高教学效率，支撑学生开展探究性学习，进行问题探究、知识建构，以及能力培养，从而很好地体现了“以学为中心”，有效地颠覆了传统课堂；同时，还可以培养学生的计算思维，以及工具化、程序化解决问题的意识，实现工程教育专业认证目标所要求的使学生“具有使用现代工具解决相关问题的意识”的目标要求。

如，关于目前国内外通行的高分子化学教科书中所普遍被提及的“ $r_1 > 1$ ， $r_2 > 1$ 时，发生的是嵌段共聚(或“嵌段”共聚)，生成的是嵌段共聚物”^[36-38,40,41]或“发生的是嵌段或嵌均共聚”^[42-44]的问题。我们在讲到竞聚率与共聚物组成曲线及共聚物类型之间的关系一节时，就将此问题提出来，并借用教科书中所给出的 $r_1 = 1.38$ ， $r_2 = 2.05$ 的苯乙烯(M_1)-异戊二烯(M_2)共聚的实例^[36-38,40,42-44]，启发、引导学生思考“真的是这样吗？你该如何证实或推翻这种观点呢？需要哪些支撑数据？以及如何获取及利用这些数据？应该从哪个角度进行思考？为什么？”从而引发质疑，引导探究，找到思路——让学生通过思考，想到可以通过分析此类共聚体系所得共聚物的序列结构，包括共聚物中两种单体单元的序列分布情况及平均序列长度，加以判断，得出结论；然后，在此基础上，指导学生利用我们自主开发的，也是迄今我们教学团队所独有的高分子化学在线解题软件，实时手机上网，通过云计算，即时得到相关问题的准确计算数据及其可视化呈现结果，并据此做出判断——实际情况并不像教科书中通常所讲的那样是发生所谓的嵌段共聚和生成所谓的嵌段共聚物，而是发生无规共聚和生成无规共聚物(因为直接将两种单体混合后进行的聚合通常不可能发生接枝共聚和得到接枝共聚物，而计算结果又表明，所得共聚物中的两种单体单元的序列都存在分布，且平均序列长度又都是大于1但又不太长的有限值，因此可以进一步排除为交替共聚、嵌均共聚以及嵌段共聚的可能，并同时表明只能是无规共聚和生成无规共聚物)。使学生通过此实际问题，在很短的课堂时间内，就能完整体验发现问题、提出问题、分析问题、解决问题的整个过程，切身体会到计算思维以及现代工具、互联网可能给专业课程学习及工作带来的巨大便利和强烈冲击，严密的逻辑思维可能带来的巨大力量，以及大胆质疑、成功挑战学术权威观点所带来的自信与正向激励，从而使其批判性思维、科学态度、综合运用所学知识“发现、提出、分析、解决”综合问题的“意识、信心、方法、能力”，以及逻辑思维等都得到培养和提高。

该软件在线版的开发获“全国高等院校化工类及相关专业数字化教学项目(高分子化学在线解题软件子项目)”经费支持(2020年)，目前，已在化工出版社“易测”平台上线测试运行(2021年4月，polychem.cipece.com)，将由化工出版社正式出版并面向全国推广应用。

将量子化学计算软件Gaussian软件及量子化学计算引入高分子化学教学^[31]，将一部分重要的自

由基聚合过程,如乙烯自由基聚合中的“回头咬”、自由基聚合的链增长过程(以乙烯及氯乙烯的自由基聚合为例)等,准确、直观、动态地呈现出来,实现可视化(补充材料中提供了部分相关文件),帮助学生理解,化解教学难点,提高教学效率和教学效果,同时也让学生了解Gaussian软件以及可以利用量子化学及量子化学计算软件解决高分子化学中的一些重要问题、困难问题。

将数据处理与绘图软件Origin软件引入高分子化学教学^[32,33],不仅藉此更新了教材中有关竞聚率测定实验数据处理方法的相关内容,也更新了学生对实验数据处理方法及处理手段的认知。

将有机化学中的切断法用于高分子化学^[35],引导学生通过知识的迁移和逆向思维,借助已有的有机化学知识,解决高分子化学中棘手的聚合物合成设计问题,并在解决问题的同时,学习思考,学会方法,进行相关学科知识的综合运用。从而,不仅从知识上,而且从方法上给学生的学习提供帮助,既解决学生容易感到困难的问题,又减少学生相关内容学习过程中的困难。

提出并订正了高分子化学教学中长期存在的若干似是而非的问题^[29],不仅将正确的知识传授给学生,而且引导学生基于已有知识,通过严密逻辑,大胆质疑,主动探究,培养学生的批判性思维、逻辑思维、质疑精神,以及发现问题、提出问题、分析问题、解决问题,和进行问题转换、通过查阅文献验证问题的意识与能力。

加大过程考核、创新作业形式,拓展作业功能,将综合性作业、探究性作业、跨学科作业、弹性作业、分层次作业,乃至个性化作业引入高分子化学教学^[28-33],引导学生主动学习,自主发展。

既有标准答案作业,也有非标准答案作业(如探究性学习总结及综合作业中的一些开放答案的问题等)、弹性作业、乃至个性化作业(综合作业中的一些并不做统一要求的延伸问题等),既有需要学生独立完成的作业,又有需要小组合作完成的作业,既有传统的手写的作业、可以自主选择手写或计算机排版后打印的作业,又有需要借助计算机软件处理数据和绘图并通过PPT汇报交流才能完成的作业。

如,通过自编综合习题并引导学生在我们的高分子化学在线解题软件支撑下进行探究性学习^[28,20,45-47](补充材料提供了参考文献28中计算问题的部分答案),既帮助学生更容易更高效的掌握相关知识,也培养学生综合性运用所学知识及主动进行知识建构的意识与能力。

将实践性作业、小组作业、合作学习、翻转课堂、自评互评、反思改进(也是学生学习角度、学习过程中的一种“持续改进”或“迭代”)等引入高分子化学教学^[32,33],培养学生的合作意识、合作能力、沟通意识、表达能力、评价能力以及学习过程中的快速迭代等元认知能力。

具体为,通过设计出跨学科、分层次的实践性、综合性、探究性的弹性乃至个性化小组作业,让学生借助Origin软件合作完成^[32,33],并进行课堂交流(翻转课堂),和结合课堂讲评,进行自评互评及课后反思与迭代改进(也是学生学习角度的一种“持续改进”)。不仅使学生通过“做中学”“教中学”“学中做”学会使用专门软件处理实验数据,解决本课程中特有的相关专业问题,而且在此过程中培养学生使用现代工具解决专业问题的意识与能力,合作、沟通、评价的意识与能力,以及学习过程中的反思及快速迭代等元认知能力,从而将工程教育专业认证培养目标中的相关要求落到实处。

这些创新作业形式取得了良好效果,受到学生的普遍欢迎,也与教育部基础教育司司长吕玉刚2021年2月23日在教育部“介绍2021年春季学期学校疫情和教育教学工作有关情况”的新闻发布会上的讲话^[48]内容不谋而合。

借助学校的智慧教室,完成了课程全程教学视频实录(2020年),并依托学校本地化部署的超星泛雅教学平台建成SPOC,成功用于教学实践(2020年)。

我们在教学过程中,注重把传授知识与传授方法、培养能力有机地结合起来,在传授知识的同时传授方法、培养能力,不仅“讲给学生听、教着学生做,做给学生看”,而且还要“看到甚至看着学生做”。通过老师的“启智、启思”,引发学生的“学问、学思”“求是、求知”,培养学生主动学习知识、建构知识以及综合性、创造性运用知识的意识与能力,变被动接受式学习为主动探究式学习,变“被教会”为“我学会”,使学生在掌握知识的同时,学习能力、思维能力得到锻炼和提高,使学生在“知其然、知其所以然”的同时,进一步具有“何以知其然”“何以知其所以然”的意识及

能力^[28–35],并在开阔学生视野、激发学生学习兴趣的同时,启发、引导和鼓励运用所学专业知识,从专业的角度独立思考问题、解决问题,培养解决复杂工程问题的能力,培养专业敏感、专业视角,同时增强工程意识、创新意识、环保意识、安全意识、法律意识、科学伦理意识、科学精神、科学态度及社会责任感^[28–35]。

如,结合2015年美国加州大旱时,洛杉矶向水库投放大量空心塑料球来抗旱和防止水藻爆发以及减少溴酸盐生成这一新闻事件中的塑料球的选材问题^[49],启发、引导学生基于所掌握的高分子化学及相关(课程)知识进行思考,尝试自己找到合适选材,并给出充分合理的支撑理由,做到不仅能“知道答案、知道为什么是这个答案”,同时具备“如何知道答案(如何找到答案)、如何知道为什么(应该)是这个答案(如何找到可以找到答案的方法和思路)”的能力,从而培养学生综合运用所学知识,包括本课程及其他相关课程所学专业知识,解决专业相关复杂工程问题的意识、信心、方法与能力以及工程意识。

本例中,我们还结合课程内容进一步让学生思考,为什么所选材质是HDPE(高密度聚乙烯)?而非PVC(聚氯乙烯)、PP(聚丙烯)或其他高分子?PVC、PP等其他高分子是否可以?为什么?加入炭黑又是出于哪些方面的考虑?为什么?你能做出合理解释吗?你能提前想到吗?为什么?从而启发学生将本章(聚合物的化学反应)中所学的聚合物的降解、老化、防老化相关知识,甚至将本课程所学知识及高分子物理课程所学知识加以综合应用,并解决真实的复杂工程问题。

该实例我们在课程第一章第一堂课时就会结合学习高分子化学的意义以及聚合物的应用等问题提出来,并在课程最后一章(聚合物的化学反应)结合相关内容(聚合物的降解、老化、防老化)的讲授再拿出来,启发、引导学生利用课堂所学内容加以解决。讲授时,还会结合相关新闻报道中的图片及gif动画,以进一步加深学生印象。

这些应用实例,看似信手拈来,实则都是靠处处留心、专业敏感、敏锐洞察、及时捕捉、广泛搜集得来,并经过精心准备和用心设计的,有些甚至是可遇不可求的实例。

另外,自20世纪90年代开始,我们就有意识地在传授知识之外,给学生补充一些“加餐”,如,根据课程特点,结合具体教学内容,将辩证法运用于高分子化学教学,启发、引导学生从哲学角度理解相关专业问题,在加深对相关专业的认识和理解的同时,培养学生的辩证思维,使学生在课程知识的同时,于方法论上亦能有所收获和提高。在此次新冠疫情期间,则结合专业特点及此次疫情中凸显出来的材料,特别是各种防护用品相关的防护材料的重要性^[50–52],适时开展专业教育,启发、引导学生进行相关思考,并利用学校本地化部署的泛雅教学平台等开展讨论,深入、全面地认识材料以及材料科学的重要性,提高专业兴趣,坚定专业信念,将理论与实际相联系,将专业与生活相联系,将教学与科研相联系,在开阔学生视野、激发学生学习兴趣的同时,启发、引导和鼓励运用所学专业知识,从专业的角度独立思考问题、解决问题,培养专业敏感、专业视角,同时增强工程意识、创新意识、环保意识、科学精神、科学态度及社会责任感,将课程思政切实落到实处。

针对偶尔会出现的抄作业现象,我们则会告诉学生,抄作业不仅是一种不诚信,更是一种不公平,抄作业不仅关乎诚信、关乎规则,更关乎公平,既然自己不希望自己在评优、评奖、保研、考研、求职等过程中被不公平对待,那就不应该采用抄作业的方式不公平待人,所谓“己所不欲勿施于人”,这既是诚信的要求,也是逻辑自洽的要求,否则就是双重标准,就如同西方某些国家在对待中国的某些问题上所表现出的那样的做法;我们还会告诉学生,抄作业不仅是一种自欺欺人、饮鸩止渴,也是一种不自信,选择抄作业就意味着失去自信,放弃成长,会使自己失去很多学习、锻炼和成长的机会和体验。从而培养学生的规则意识、诚信意识、公平意识以及自信心。我们的这些劝导、分析,没有大道理,却有真力量,没有多说教,却能真说服。

又比如,2020年秋季学期开学第一课,我们就结合美国对我国的芯片“卡脖子”,讲到了与之相关的关键技术(光刻技术)及关键材料(光刻胶),从而让学生从非常现实的问题以及一个真实的侧面

真切地认识到高分子材料的重要性,认识到学习相关专业、相关课程的必要性、重要性,激发学生的家国情怀、发奋精神以及专业自信与学习热情。反馈结果显示起到了应有的作用,学生也对此印象深刻。

针对开展团队多教学班小班化教学时遇到的教学质量提高及保证问题,我们根据团队具体情况,提出了“同步、同质、同效”的“三同”原则及目标,并将其引入高分子化学团队教学,探索实现团队平行班教学实质等效的有效途径和可行方法。

其中,同步是措施,是形式;同质是标准,是要求;同效是目标,是追求。

通过采用相同的教学进度安排,达到“同步”,通过老教师分享全部课件等教学资料,分享教学心得、经验及体会、收获,以及团队专题教研活动、集体备课、观摩教学、随时交流、带领年轻教师开展课程教学研究等,充分发挥老教师的“传帮带”作用,带动年轻教师通过“比学赶帮超”快速熟悉本课程教学各环节和提高教学能力、教学水平,实现“同课同构”,并达到“同质”,再通过布置相同的作业、相同的过程考核办法及考核标准、提供相同的在线解题软件辅助、提供相同的SPOC课程资源等,保证和达到“同效”(详见表1)。

目前,此方法已经取得了一定成效,但尚需进一步探索、完善。

本课程教学中的其他一些问题及其解决思路与创新实践见表1。

3 创新成效

我们的创新教学取得了优良的教学效果,并受到学生的普遍欢迎,课程始终为学校优质课程,学生评教始终名列前茅,也经受住了历年研究生入学考试的检验,学生在历年研究生入学考试中普遍取得好成绩,并有多名学生在校学习期间在SCI期刊发表论文或在各种竞赛中获奖。

很多学生通过调查问卷或探究性学习总结作业表达了本课程学习给其带来的收获与欣喜,反馈其通过本课程的学习,锻炼了自主思考能力,体会到了利用计算机带来的方便,有了远超以往的不一样的收获。

还有的学生用“课,原来还可以这么上”来表达其对本课程的感受。

我们于2020年秋季学期开始尝试的避免团队平行班教学出现较大差异的相关举措,业已初见成效,“三同”目标已初步达成,课程团队中第一次主讲本课程的四位年轻教师中,有三位的评教结果已经处于学院前36%–45%之间。

4 讨论

与现在有些课程教学改革工作,开始之前就有明确的指导思想,或者就是在全社会业已形成广泛共识的、工程教育专业认证所明确要求的“以学生为中心”的教育理念的直接导引下进行,甚至只是为了满足这一要求而进行的(要求驱动的)不同,我们的许多改革创新工作,都是在教学实践中遇到或发现问题后(问题驱动的),经过不断思考、反复实践、逐渐认识、多轮教学实践迭代基础上,逐步形成和完善的,也就是经过了“从实践中来,到实践中去”的“实践、认识、再实践、再认识”^[53]的过程之后产生的(实际上,这本身也就是一种“持续改进”),比如,本文前言中所提及的、我们于2000年树立的教学思想、教学理念,就是如此,其并不是一开始就有的,而是我们在从20世纪90年代初就开始进行的若干年的改革创新实践探索的基础上,于2000年总结、提炼之前所做工作,准备申报省级教学成果奖时才发现,原来我们之前那么多年来改革创新工作一直都是围绕“以学生为中心”在进行的,并因而将其凝练、升华为我们的教学思想、教学理念,进而作为我们当时申报省级教学成果一等奖工作的第一个创新点,并一直用它来指导此后我们的课程改革与教学创新工作。现在回过头来看,至少在这一点上,我们的工作还是很有前瞻性的。当然,20年后的现在,其已经是尽人皆知,并广为接受的教育理念了,这一点自然也就算不得什么了。

我们在课程思政方面的努力和教学创新也是如此,从20世纪90年代开始,我们就一直在传授知

识(为学生提供“正餐”)的同时,结合学科、课程特点及典型实例、相关热点新闻、热点事件,如,结合脂肪族聚酯及相关教学内容等展开的有关可降解塑料、限塑令及白色污染与环境保护的话题讨论;结合建筑外墙高分子保温材料导致的严重火灾事故进行的节能环保与安全的优先序、效益与安全、效益与法规、保温与阻燃等问题的讨论;结合媒体报道的、涉及四氯化钛的生产安全事故所进行的课程相关内容的介绍及实验安全教育;热点新闻中的景点玻璃桥与安全玻璃;Carothers令人遗憾和惋惜的个人悲剧与珍爱生命(相关问题国内同行最近已进行了专门报道^[54])等等,培养学生的科学精神、科学态度、环保意识、社会责任感以及辩证思维(为学生提供各种“加餐”),并将其作为我们当时申报2001年山东省省级教学成果一等奖的另一个创新点。现在回过头来看,这就是一直在自觉践行课程思政,这些“加餐”就是现在课程思政所要求的“正餐”,这种意识和做法也是比较有前瞻性的。

我们这些改革与创新所解决的难点、“痛点”问题以及学生学习过程之的短板问题,有些是我们的高分子化学课程以及我们的学生所特有的,有些是所有工科专业或工科学生都会有的,有些则是高等教育所有课程、所有学生需要共同面对的。

5 结语

根据课程特点及人才培养需要,进行了高分子化学课程的一系列教学改革与创新,在传授知识的同时,培养学生的学习兴趣;在传授知识的同时,传授学习的方法、培养学生主动学习的意识、提高自主学习及发散思维的能力;在传授知识的同时,培养学生的科学精神与科学态度;在传授知识的同时,增强学生的环保意识及社会责任感;加强与相关课程的渗透与交叉,与科研的结合、互动,引导学生开阔思路、广泛借鉴,触类旁通,提高综合运用知识解决实际问题的能力。

上述创新教学解决了高分子化学课程教学中的若干难点、“痛点”问题以及学生学习过程的短板问题,取得了一定成效,建成了省级一流课程,也受到了学生普遍欢迎。

部分做法可供同行参考、借鉴。

致谢:感谢青岛大学教务处教学评价科张永进、王晓辉提供学生评教结果,并帮助做学生问卷调查及反馈调查问卷结果。

补充材料:可通过链接<http://www.dxxh.pku.edu.cn>免费下载。

参 考 文 献

- [1] 周长忍. 大学化学, **1988**, 3 (4), 58.
- [2] 屠湘同. 大学化学, **1989**, 4 (2), 23.
- [3] 宗惠娟, 潘才元, 徐文英. 高分子通报, **1990**, No. 1, 51.
- [4] 徐文书, 周长忍. 大学化学, **1990**, 5 (6), 16.
- [5] 周其凤. 大学化学, **1995**, 10 (2), 63.
- [6] 戴鹏, 张其锦. 大学化学, **1998**, 13 (1), 32.
- [7] 黄美荣. 建材高教理论与实践, **1999**, No. 1, 77.
- [8] 黄美荣. 建材高教理论与实践, **2000**, No. 5, 75.
- [9] 黄美荣. 大学化学, **2001**, 16 (2), 35.
- [10] 黄美荣, 李新贵. 高分子通报, **2004**, No. 2, 96.
- [11] 邓奎林, 钟海滨, 张朋飞, 任晓波, 宋津津, 田华, 王素娟. 大学化学, **2010**, 25 (3), 67.
- [12] 何卫东, 白如科, 潘才元. 高分子通报, **2010**, No. 7, 103.
- [13] 何卫东, 白如科, 潘才元. 高分子通报, **2010**, No. 10, 116.
- [14] 张道洪, 程新建, 李廷成, 张爱清. 大学化学, **2013**, 28 (4), 77.
- [15] 唐黎明. 高分子通报, **2014**, No. 7, 104.

- [16] 唐黎明. 高分子通报, **2017**, No. 4, 72.
- [17] 彭志平. 大学化学, **2020**, *35* (5), 184.
- [18] 丁绪银, 寸菲, 谢美然. 大学化学, **2020**, *35* (1), 105.
- [19] 刘轶, 林权, 刘堃, 张皓, 宋文龙, 史作森, 崔占臣, 张恺, 张俊虎. 大学化学, **2021**, *36* (8), 2011017.
- [20] 孟志芬. 大学化学, **2021**, *36* (2), 2001002.
- [21] 郭霖. 高分子通报, **1996**, No. 4, 252.
- [22] 郭霖. 高分子通报, **1997**, No. 3, 195.
- [23] 郭霖. 化学通报, **1998**, No. 6, 58.
- [24] 郭霖, 肖育军. 化学研究与应用, **1998**, *10* (4), 436.
- [25] 郭霖. 化学通报, **2001**, No. 8, 524.
- [26] 郭霖. 计算机与应用化学, **2001**, *18* (6), 596.
- [27] 郭霖, 高勇, 梁学建, 张兴利. 计算机与应用化学, **2002**, *19* (4), 508.
- [28] 郭霖, 隋坤艳, 丛海林, 张小艳, 王久兴, 王彦欣. 大学化学, **2021**, *36* (4), 2005037.
- [29] 郭霖, 隋坤艳, 胡浩, 王久兴, 王逸凡, 张小艳, 彭乔虹, 随欣. 大学化学, **2021**, *36* (8), 2009004.
- [30] 郭霖, 王婧, 姜安宝, 丛海林, 隋坤艳, 王逸凡, 张小艳, 王久兴, 黄林军, 胡浩等. 高分子通报, **2021**, No. 1, 84.
- [31] 郭霖, 丛海林, 隋坤艳, 王彦欣, 王逸凡, 张小艳, 王久兴. 高分子通报, **2021**, No. 3, 75.
- [32] 郭霖. 高分子通报, **2021**, No. 7, 79.
- [33] 郭霖. 高分子通报, **2021**, No. 8, 49.
- [34] 郭霖. 大学化学, **1998**, *13* (5), 57.
- [35] 郭霖. 大学化学, **2021**, *36* (12), 2101004.
- [36] 潘祖仁. 高分子化学. 第5版. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [37] 唐黎明, 庾新林. 高分子化学. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [38] 张兴英. 高分子化学. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [39] 中国工程教育专业认证协会. 工程教育认证一本通. 北京: 教育科学出版社, 2015: 46.
- [40] 潘才元. 高分子化学. 第2版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012.
- [41] Odian, G. *Principles of Polymerization*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Inc.: NY, USA, 2004.
- [42] 江波, 殷勤俭, 王亚宁, 王槐三. 高分子化学教程. 第5版. 北京: 科学出版社, 2019.
- [43] 张邦华, 朱常英, 郭天瑛. 近代高分子科学. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [44] 卢江, 梁晖. 高分子化学. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [45] 曹渊, 刘作华, 张云怀. 大学化学, **2006**, *21* (3), 18.
- [46] 裴伟伟. 大学化学, **2003**, *18* (2), 3.
- [47] 王夔. 大学化学, **1988**, *3* (4), 14.
- [48] 中华人民共和国教育部新闻发布会: 介绍2021年春节前期学校疫情防控和教育教学工作有关情况. (2021-02-23) [2021-02-26].
<http://www.moe.gov.cn/gbh/live/2021/52921>
- [49] (a) 洛杉矶抗旱相关美国加州推抗旱新方法, 水库投放近1亿塑料球. (2015-08-14) [2021-03-10].
http://www.xinhuanet.com/world/2015-08/14/c_128125462.htm
(b) 美国洛杉矶推抗旱新方法水库, 投放9600万塑料球. (2015-08-12) [2021-03-10].
<http://world.people.com.cn/n/2015/0812/c157278-27451176.html>
- [50] 颜静, 李宇琛, 钟丰璘, 闫毅. 大学化学, **2020**, *35* (12), 71.
- [51] 金邦坤, 朱平平. 大学化学, **2020**, *35* (12), 64.
- [52] 常静, 商闯, 魏玉萍. 大学化学, **2020**, *35* (12), 77.
- [53] 毛泽东. 毛泽东选集(实践论). 北京: 人民出版社, 1964: 273.
- [54] 秦四勇, 李琳, 江华芳. 大学化学, **2021**, *36* (3), 2007053.