

高分子化学实验课程教学改革的探索与实践

杨帆*, 白艳红, 高品, 段新华, 解云川

西安交通大学化学学院, 西安 710049

摘要: 高分子化学实验不仅是提升学生实验技能与实践能力的关键途径, 更是培育学生创新思维及科研素养的重要环节。为切实提高实验教学效果和质量, 充分激发学生主动学习的内驱力, 全面培养探索精神、创新能力和思辨思维, 我校高分子化学及实验教学组积极开展教学改革探索和实践, 首先, 精心设计教学内容, 确保知识的关联性和实用性; 其次, 革新实验教学方法, 增强实验教学的互动性和创新性; 再次, 完善教学评价机制, 强化过程考核; 最后, 全面融入课程思政, 实现知识传授与价值引领的有机统一。

关键词: 高分子化学实验; 教学改革; 教学方法; 教学评价; 课程思政

中图分类号: G64; O6

Exploration and Practice of Teaching Reform in Polymer Chemistry Experiment Course

Fan Yang*, Yanhong Bai, Pin Gao, Xinhua Duan, Yunchuan Xie

School of Chemistry, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China.

Abstract: Polymer chemistry experiment course is not only a key approach to enhance students' experimental skills and practical abilities, but also an important link in cultivating students' innovative thinking and scientific research literacy. In order to significantly improve the effect and quality of experimental teaching, fully inspire students' intrinsic motivation of active learning and comprehensively cultivate their exploration spirit, innovation ability, and speculative thinking, our team carries out exploration and practice on the reform of polymer chemistry experiment teaching actively. Firstly, the teaching contents are designed carefully to ensure the relevance and practicality of knowledge. Secondly, the teaching methods are innovated to enhance the interactivity and creativity of experimental teaching. Thirdly, the teaching evaluation mechanism are improved to strengthen the assessment of the process. Finally, course ideology and political education are fully integrated into experimental teaching to realize the organic unity of knowledge impartation and value guidance.

Key Words: Polymer chemistry experiment course; Teaching reform; Teaching methodology; Teaching evaluation; Course ideology and politics

1 引言

高分子化学实验是我校化学、应用化学及材料化学的专业核心必修课, 以有机化学实验、物理化学实验等为基础, 教学内容不仅覆盖了高分子化学的常见聚合方法, 如本体聚合、溶液聚合、悬浮聚合和乳液聚合等, 还包含聚合物结构测定、性能表征和综合应用等多方面内容的综合性和设计性实验^[1]。教学过程中通过原理讲解、实验操作训练、问题探讨、报告总结及反馈思考等环节, 深化

收稿: 2024-12-02; 录用: 2025-03-25; 网络发表: 2025-06-13

*通讯作者, Email: yangfan1987@xjtu.edu.cn

基金资助: 教育部产学合作协同育人项目(23072528282807303)

学生对高分子化学基本原理的理解, 敦促学生熟练掌握常用的高分子合成技术和实验技能, 培养学生发现问题、分析问题和解决问题的综合实验能力, 培育学生严谨求实的科研态度和创新探索的思维习惯, 提升创新能力和科研素养。本文将围绕我校在 高分子化学实验的教学内容、教学方法、评价体系以及实验教学中融入课程思政等方面所进行的尝试与实践展开探讨和总结。通过这些实验教学改革, 我们期望能够为学生提供一个全面、系统的高分子化学实验学习平台, 助力他们在学习和科研的道路上不断前进。

2 精心设计实验教学内容, 激发主动学习内驱力

2.1 有机融合聚合物制备、结构和性能表征及简单加工成型

通过对其他兄弟高校的调研发现, 高分子化学实验通常开设在大三学年, 我校的具体开课时间为大三第二学期, 高分子化学实验和高分子物理实验两门课程同步开设。前者的教学内容主要聚焦在经典高分子合成方法的实验应用和新型聚合物的实验室制备方面; 后者则讲授高分子结构及性能表征方法和仪器使用, 如聚合物玻璃态转变温度的测定, 高分子材料的冲击性能测试等; 尽管两门课程同步进行教学, 但教学内容的衔接性有待加强, 高分子化学实验往往只完成聚合物的制备, 产物结构测定和性能测试很少涉及, 实验是否成功往往依赖产物外观而无客观数据支持^[2,3]。而高分子物理实验通常需授课教师提前为学生准备测试样品。为解决这一问题, 经过授课教师的协商和讨论, 高分子化学及实验教学组决定将高分子材料的合成、结构测试、性能表征及简单加工成型有机融合, 增加课程的系统性和关联性, 具体实验项目如表1所列。

表1 高分子化学实验和高分子物理实验融合实验项目列表

实验项目	知识点	性能表征
本体聚合法制备有机玻璃实验	本体聚合	1. 玻璃态转变温度的测定 2. 分子量及分子量分布的测定
动态交联可再生聚脲的合成与表征	动态交联聚合物的合成	模压实验
环氧树脂纳米复合材料的制备	复合材料制备	1. 冲击强度的测定 2. 介电性能测试 3. 玻璃化转变温度(T_g)测定
阳离子交换树脂的制备	悬浮聚合	显微镜观测交联微球的形貌

以“本体聚合法制备有机玻璃”实验为例, 在该实验中增加了通过差示扫描量热法(DSC)测定产物的玻璃态转变温度和凝胶渗透色谱(GPC)测定产物分子量的内容, 鼓励学生发挥想象和创意, 自主设计有机玻璃制品, 进而初步掌握高分子简单加工成型的相关知识和操作技能。将聚合物制备、结构和性能表征及加工成型有机融合的举措具有以下优点: (1) 充分利用高分子化学实验所制备的产物, 符合绿色环保的理念; (2) 解决了高分子物理实验课前教师准备样品的问题, 减轻了教师的工作量; (3) 用学生自己合成的产物进行性能测试和结构分析, 不仅节约了实验成本, 还能直观呈现产物的性能指标, 督促学生精益求精做好实验。(4) 增加了学生的学习积极性和热情, 激发了主动学习的内驱力。

在教学实践中, 也有可能出现意外状况, 例如学生不能成功获得目标产品或产物质量不佳, 从而无法进行后续的性能表征及实验。针对这种情况, 教学组采取了以下措施: (1) 引导学生复盘实验过程、分析可能的失败原因, 如反应条件、原料纯度等, 鼓励学生重新设计实验方案并改进; (2) 提供少量标准样品供学生进行对比测试; (3) 组织小组讨论, 引导学生分析结果差异的原因, 探讨实验改进方法。

2.2 巧用思维导图，实验教学紧密结合实际应用

综合创新性和设计性高分子实验项目更加侧重知识点的融合、材料的表征分析和综合应用，是进一步提升学生综合实践能力和探究创新能力的重要载体。通过思维导图整合梳理涉及的背景知识、材料的制备和性能表征、应用场景等，不仅有利于学生高效整合知识信息、明确实验任务和分工，更有助于学生形成基本的科研思路并掌握高分子材料的研究方法^[4,5]。

2.2.1 思维导图实例

以“环氧树脂纳米复合材料的制备及性能表征”实验为例，在实验教学过程中，通过对环氧树脂和环氧树脂基复合材料的介绍，不仅梳理了实验项目所涵盖的核心知识点，帮助学生构建了系统的知识框架，更将实验产物与实际应用紧密结合，搭建了实验教学与生活生产间的桥梁，进而促进了学生对实验研究背景和教学意义的理解，激发了学生的求知热情和学习积极性。授课教师将全班16位同学分成3个小组，分别负责制备SiO₂/环氧树脂复合材料、BN/环氧树脂复合材料和Al₂O₃/AlN/环氧树脂复合材料，分组实验既让学生掌握了不同材料的制备技术和特性，又锻炼了他们的团队协作能力。随后，每小组对不同材料进行一系列差异化的表征测试，如力学、热学和电学性能测试等。通过这些测试，学生能够从多角度评估所制备材料的性能并明确其潜在的应用场景，如环氧树脂纳米复合材料因具有高强度和轻质的特点，适用于制造飞机的机翼等关键部件，而优异的绝缘性和热稳定性则使其成为理想的电路板封装材料等。

在实验过程中，学生可能会遇到纳米填料分散不均匀、实验设备操作不熟练、对测试原理不了解或对测试曲线解析困难等问题。为解决这些问题，教师在实验前会详细讲解实验操作流程和测试原理，结合实际仪器进行关键步骤的操作演示；同时，提供标准化的操作流程和注意事项，加强实验过程中的巡视指导，及时帮助学生调整实验条件，优化操作步骤，确保实验顺利进行并获取可靠数据。对测试结果解析困难的同学，教师还会组织结果分析讨论，帮助学生解读测试曲线和数据，引导他们从多角度分析材料性能。通过在分子实验教学中引入思维导图，提升了学生对高分子材料实验研究到实际应用全过程的理解和认知，有助于他们形成“实验设计-材料制备-表征测试-实践应用”的科研思路和方法，为其今后从事相关研究和工作奠定坚实的基础，具体思维导图如图1所示。

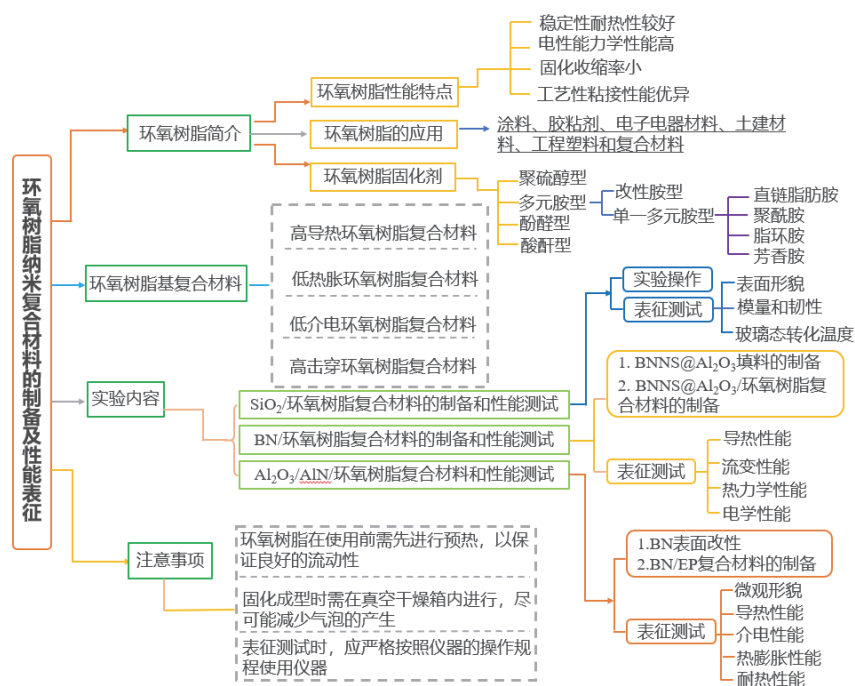


图1 环氧树脂纳米复合材料的制备及性能表征实验思维导图

2.2.2 思维导图问卷调研

经过5轮教学实践,为考查思维导图的应用成效及学生的认可度,高分子化学及实验教学组对思维导图的教学效果进行了问卷调研,调查内容主要包括“对思维导图是否感兴趣”等6个问题。共145位同学参加调查问卷,统计结果如表2所示。从表中所列数据可以看出,学生对实验教学中应用思维导图这一举措有较感兴趣且认为对实验学习有帮助,总体满意度达到98.6%。58.6%的同学认为有助于知识点的整合,且主要有助于记忆能力、知识梳理能力、理解能力和创新能力的提高。

表2 思维导图在 高分子化学实验中应用的调研分析

调查问题	选项及人数比例
1. 在其他实验课程中是否应用过思维导图?	A. 用过(24.8%) B. 没有用过(75.2%)
2. 你对在 高分子化学实验中使用思维导图是否感兴趣?	A. 感兴趣(94.5%) B. 无所谓(5.5%) C. 不感兴趣(0%)
3. 思维导图对你的实验学习是否有帮助?	A. 帮助很大(84.1%) B. 有帮助(15.9%) C. 没有帮助(0%)
4. 你认为思维导图的优点有哪些?	A. 条理清晰,便于知识点的整合(58.6%) B. 有助于建立知识网络,便于理解并加强知识的延伸和拓展(17.2%) C. 有助于激发学习兴趣(10.3%) D. 重难点突出,有效指导实验的进行(6.9%) E. 能培养发散思维(7.0%)
5. 思维导图对你哪些能力的提升有促进?	A. 记忆能力(48.3%) B. 理解能力(12.4%) C. 创新能力(8.3%) D. 知识梳理能力(31.0%)
6. 你对思维导图在 高分子化学实验中应用的总体评价	A. 非常满意(37.9%) B. 满意(60.7%) C. 一般(1.4%) D. 不满意(0%)

2.3 文献检索工具和数据处理软件培训及应用

2.3.1 文献检索工具培训和使用

我校的高分子化学实验课程由11个实验项目组成,其中4学时实验有10个,另1个实验为8学时,总计48学时。在教学过程中,4个4学时的实验项目采用小组讲解的形式进行教学。每个小组由4位同学组成,在查阅文献资料的基础上,每个小组需完成包含实验原理、实验操作内容、注意事项、产物应用等模块的课件制作及讲解。为了帮助学生获取更全面的最新研究进展的文献资料,教学组就文献检索工具(如Scifinder)及中英文数据库(如中国知网、万方、维普、Science、Nature、美国化学会(ACS)、英国皇家化学学会(RSC)等)的使用进行了培训,既能保证同学们顺利完成小组实验设计及讲解任务,也让学生提前掌握了文献检索的方法和路径,得到了同学们的一致认可和肯定。一位同学说:“我曾在网上看到一项调查,统计结果显示科研人员工作时间分配中信息收集占了50.90%。通过老师对文献检索工具及数据库的培训,我能轻松查阅自己想了解的相关领域的最新文献资料,让

我的小组实验设计和讲解有据可依，同时，拓展了我的视野和眼界，对我研究生阶段的学习将会有很大的帮助。”

2.3.2 Origin软件处理实验数据

“膨胀计法测定甲基丙烯酸甲酯本体聚合反应速率”和“环氧树脂纳米复合材料的制备及性能表征”等实验均会涉及到数据的处理。此前，学生用专业软件分析实验数据的机会相对较少，可能会出现软件界面不熟悉、参数设置错误、分析方法不当等问题。我们鼓励同学间相互学习、自发在群里进行讨论，最终找到出现问题的原因并解决问题，如图2所示。数据处理能力是化学实验教学中培养的核心能力之一，在学生的继续深造或工作实践中发挥着重要作用。



图2 师生间的问题讨论

2.4 引入创新实验和实验竞赛，助力综合能力培养

教育部2019年10月出台的《关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见》明确提出“推动科研反哺教学，强化科研育人功能，推动高校及时把最新科研成果转化为教学内容，激发学生专业学习兴趣。”为提升学生的实践能力和创新能力，高分子化学及实验教学组积极探索将前沿科研成果转化为教学内容，以创新训练项目的形式组织本科生参与项目式研究，引导学生自主设计实验内容和测试方法，独立完成数据的记录、处理和分析，培养学生的创新意识和科研能力，实现科研反哺教学^[6-9]，具体的实验项目如表3所列。在引入创新实验项目的过程中，学生可能会因对前沿知识和技术不熟悉而遇到实验设计和操作困难，或因缺乏经验而难以准确分析实验数据。为此，教学组组织专题培训，帮助学生快速掌握相关知识和技能；同时，指导教师全程跟踪指导，及时解答问题，并引导学生分析数据、改进方案，确保学生顺利完成创新实验项目。

表3 创新实验项目列表

序号	项目名称
1	电工环氧树脂的绿色降解和高值化回收再利用
2	高频低损耗环氧基复合材料的研发及性能研究
3	聚合物复合电介质的制备及电场模拟
4	高力学性能、低介电损耗、可回收的聚苯乙烯Vitrimer材料
5	高储能脉冲电容器电工膜用改性聚丙烯制备技术

此外，教学组将实验竞赛与实验教学有机融合，以竞赛的标准规范学生的实验操作，显著提高了学生的实验技能。目前，我校已组织学生参加全国大学生高分子材料实验实践大赛、全国大学生

化学实验创新设计大赛、全国大学生化学实验竞赛等有影响力的赛事，累计获奖40余项。以全国大学生高分子材料实验实践大赛为例，该赛事自创办以来已成功举办四届。作为一项专业性极强的学科竞赛，它为高分子相关专业的学生搭建了展示专业素养、锻炼实践能力和激发创新思维的优质平台，全方位检验了学生的实操技能和实践素养。通过参赛，同学们能够更深入地理解理论知识，并将其灵活运用于实验操作中，显著提升了分析研究及应变处理能力。同时，竞赛对实验安全的严格要求，也潜移默化地增强了学生的安全意识。自本赛事举办以来，我校共有12位本科三年级同学参赛，参赛学生的保研率达83.3%，深造率为100%，其中，1位同学保研至中国科学院化学研究所，9人保研至985高校，2人通过考研进入985大学深造。这些成绩的取得，与他们在竞赛中积累的创新思维和实践能力密不可分，充分彰显了我校将实验竞赛与教学相结合的显著成效。

3 问题引导探究式授课，高效提升教学质量

经过5轮教学实践的探索与优化，高分子化学实验课程成功构建了“单人单组操作”“小组研讨”和“翻转课堂”相结合的创新授课模式。其中小组研讨以问题引导探究式教学为依托，在课前预习、实验操作和总结拓展三个阶段分别设定问题，引导学生主动思考并探索解决方案、形成思辨性思维。以“本体聚合法制备有机玻璃实验”为例，详细说明在分子化学实验中问题引导探究式教学的实施^[10-12]。

课前预习阶段设置的问题主要涵盖了实验原理、装置的搭建及样品精制纯化等相关内容，学生通过教材学习、文献查阅等可以解答相关问题。通过设置课前预习问题，学生了解了聚合反应装置的搭建方法和要求，掌握了所涉及的实验原理及试剂纯化的方法等。这不仅加深了学生对理论知识的理解和掌握，为后续学习奠定基础，更培养了学生实践联系理论的思维习惯。同时，预习问题的设置也促使学生更加清楚后续的实验操作内容，从而能够有针对性地观察、记录实验现象，对易于出现的意外状况做到心中有数并能及时高效处理。据授课教师统计，引入问题引导探究式教学后，学生参与实验的积极性显著提高，教改前学生主动参与课前预习的比例仅为56.25%，教改后，该比例提升至100%。这表明，通过课前预习问题的引导，学生的学习兴趣和自主学习能力得到了有效激发，为后续实验操作的顺利开展提供了有力保障。

实验操作阶段的引导性问题涉及实验现象解释、实操技巧、实验数据记录及分析等。问题的解答需要学生仔细观察实验现象，紧密联系所学的理论知识和善用积累的实验操作经验等。实验总结拓展阶段的问题设置，主要以知识衍生、产品表征、实验方案改进、产品应用、行业卡脖子问题及产物回收再利用等内容为主题。拓展问题的探究不仅能促进学生对高分子产品制备、表征分析和生产应用全产业链的了解，更让学生看到化学在日常的衣食住行等各行业发挥的重要作用。在“天坑”专业言论盛行的境况下，这对增强学生的学习兴趣和自信是非常有帮助的。探究式问题的引入能够激励学生思考有没有更优的实验方案，同时，在问题中渗透绿色环保理念、行业“卡脖子”问题、行业困境等内容，让学生明白自身肩负的责任，从而强化他们的责任感和使命感，具体问题设置如图3所示。课程成绩显示，教学改革后，学生实验成绩优秀率(85分以上)从75%提高至93.75%，学生在实验操作阶段的参与度显著提升。这表明，问题引导探究式教学有效提升了学生的积极性和实践能力，教学改革取得了较好的效果。

4 完善教学评价，强化过程考核

通过课程考核，教师能够准确掌握学生对课程内容的掌握程度，评估教学目标是否实现，进而反思并优化教学方法。而高校通过分析考核结果，可以洞察课程设置的科学性和合理性，进一步优化完善课程体系，使其更加契合人才培养的需求。因此，课程考核不仅是教育教学过程中的关键环节，更是高校完善和构建多元化课程体系，实现教育目标和提高教育质量的重要措施。为了全方位评估学生的学习成效，进一步激发学生的探索热情和创新意识，推动学生综合素质的全面提升，高

分子化学及实验教学组对过程性评价进行了深化, 不仅关注学生的期末成绩, 更重视学生在实验操作过程中的综合表现。指导教师全程跟进学生的实验活动, 实时检查并指导学生的实验操作, 当遇到突发状况, 教师积极引导學生进行深入思考, 协助学生分析问题所在并共同探索解决方案, 从而显著提升师生在课堂教学中的互动性和参与度^[3]。经过调整的高分子化学实验成绩评定体系主要包括以下四个方面, 如表4所示: (1) 实验预习(占比10%), 主要包括文献资料查阅、操作视频学习和预习测验; (2) 实验操作考核(占比40%), 包括实验设计和讲解(10%)、数据记录和现象解释(15%)、实验操作及异常情况处理能力(15%); (3) 实验报告(占比40%), 其中实验数据分析处理占20%, 实验报告占20%。若实验未能成功, 没有最终的实验产物和数据, 但若能够详尽分析失败原因并提出切实可行的改进措施, 同样予以评分。(4) 课堂讨论(占比10%), 为了充分利用实验课堂时间, 在实验反应进行的同时, 巧妙设置实验的关联性讨论, 教师提前发布讨论主题, 鼓励学生围绕新研究内容、新方法、新技术等展开深入探讨。调整后的实验考核方式更加注重实验过程评价, 强调实验中的创新性表现, 有利于激发学生的创造力和探索欲, 更加有利于提升教学效果。

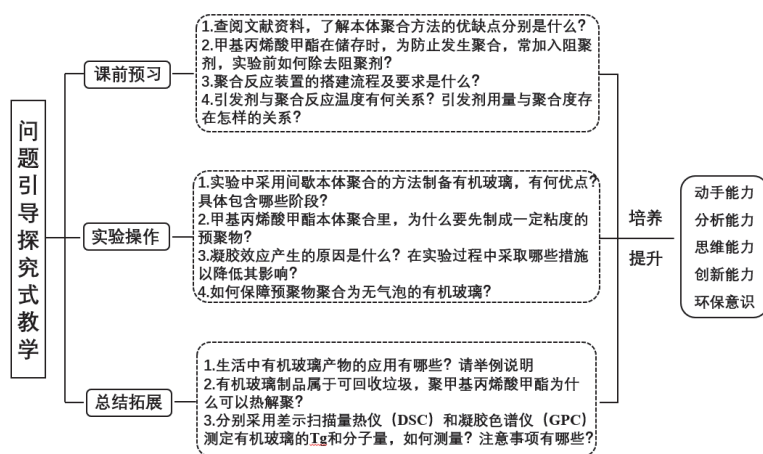


图3 问题引导探究式教学实例

表4 高分子化学实验过程性考核

序号	考核模块	考核内容	依托形式	成绩占比
1	实验预习	资料查阅	思源学堂	10%
		操作视频学习		
		预习测验		
2	实验操作	实验设计与讲解	同学互评	10%
		实验操作	实践操作	15%
		现象分析、数据记录		15%
3	实验报告	实验报告	教师评价	20%
		数据处理和分析		20%
4	课堂讨论	问题回答	教师评价	10%
			同学互评	

5 全面融入课程思政

“课程思政”是落实立德树人的重要战略性和实践性工作, 是推动课堂教学改革的重要抓手, 更是提升育人质量的有效途径。在分子化学实验课程中, 将课程思政与实验教学有效融合, 不仅促

进了学生对专业知识的掌握和实践技能的提升,还逐步增强了学生对知识的理解和运用能力。同时,两者的融合也使学生在实验教学实践中深刻认识到肩负的责任和使命,进一步增强学生对所学专业的自信心和自豪感^[13-15]。

高分子化学实验课程以诺贝尔奖获得者故事、高分子科学家的光辉事迹、高分子化学的发展历程、高分子材料在关键领域的“卡脖子”技术突破,以及高分子材料在各行各业的广泛应用和相关时事热点为切入点(如表5所列)。以注重细节、严谨务实、精益求精追求卓越的科学态度,无私奉献、艰苦创业的西迁精神,自主创新、自立自强和勇于探索的科学家精神,四个自信、绿色生态观和可持续发展观等四方面内容为思政教育融合点。从指导学生精准完成每一个高分子化学实验,到将他们培养成为高分子领域的专业人才,使其能运用专业知识为祖国建设贡献力量、保护全球环境,再到培育学生的家国情怀、助力中国梦的实现,课程全方位制定并切实落实各层次的培养目标。同时,课程还借由交通大学杰出校友、被誉为“中国稀土之父”的徐光宪先生的谆谆教诲来激励学生:“年轻人要有时代幸福感、社会责任感和时代使命感……未来需要年轻人负担起来,”激发学生科技报国的使命意识和责任担当。

表5 高分子化学实验课程思政实例

实验项目	思政实例	思政元素
单体和引发剂的精制	1. 诺贝尔奖获得者白川英树的故事	注重细节、严谨务实 精益求精的科学态度
	2. 交通大学杰出校友“中国稀土之父”徐光宪先生四次转变科研方向的生平经历	创新精神、求实精神、爱国主义精神与 浓厚教育情怀
有机玻璃的制备及表征(本体聚合)	1. 高分子材料在新冠疫情中的作用 2. 隐形眼镜材料的发展	四个自信、高分子材料与人类健康
苯乙烯与甲基丙烯酸甲酯共聚及竞聚率的测定	白色污染及可降解高分子材料	环保意识、绿色生态观和可持续发展观
酚醛树脂的合成	2020年甬莞高速苯酚泄露	树立安全意识,形成规范使用化学品的习惯
聚氨酯泡沫塑料的制备	中国深海载人潜水器中浮力材料的卡脖子问题	自主创新、科技报国
离子交换树脂的制备及性能测试	“离子交换树脂之父”何炳林先生的事迹及离子交换树脂在生活、生产中的应用	热爱科学、严谨治学、艰苦创业、甘于奉献和家国情怀
环氧树脂纳米复合材料的制备	环氧树脂在电子领域的应用瓶颈和环氧复合材料再航空、航天、军事等领域的应用	西迁精神、科技创新、自立自强和勇于探索的科学家精神

6 结语

为全面提升高分子化学实验教学质量和效果,培养出具有创新精神和实践能力的优秀本科生,我校高分子化学及实验教学组从多方面入手进行教学改革。在教学内容设计方面,教学组成员精心策划,引入思维导图,将聚合物的制备、性能表征、简单成型加工及具体应用有机融合,助力学生形成初步的科研思路和方法。在实验教学中加强文献检索等工具培训,拓展学生获取知识的途径。此外,鼓励学生参与创新实验和各类竞赛,激发学生的学习兴趣 and 主动学习的内驱力。教学方法上,采用问题引导探究式教学,以动手实践刺激动脑思考,促使学生在实验实践中不断提升思辨能力,提升学生发现问题、分析问题和解决问题的综合能力。完善教学评价标准、强化过程考核并重视学生的创新表现,进而激发学生的创造力和探索欲,最终显著提高教学效果。不仅如此,教学组还将课程思政与实验教学有机融合,在传授知识、提升技能、培养能力的过程中,注重价值引领,让学

生在学习专业知识的同时，树立正确的价值观和科学精神，明白他们肩负的责任和使命，指引其未来努力和发展的方向。

参 考 文 献

- [1] 尚成新, 郝俊生, 王松柏. 应用化学, **2024**, *3* (41), 452.
- [2] 杨金燕, 赖俐超. 高分子通报, **2019**, No. 9, 87.
- [3] 刘益江, 姜忠民, 阳梅, 黎华明. 化学教育(中英文), **2023**, No. 10, 63.
- [4] 霍利军, 倪健领. 大学化学, **2021**, *36* (7), 2101041.
- [5] 温昕, 王素娟, 田月兰, 顾芳. 化学教育(中英文), **2023**, *18* (44), 64.
- [6] 王玉芹, 许斌, 丁益民, 曹志源. 实验室研究与探索, **2016**, No. 4, 223.
- [7] 周佳, 朱要云. 化工高等教育, **2022**, *3* (39), 90.
- [8] 张来英, 吴莹焕, 喻雅姿, 徐业成, 张豪杰, 吴伟泰. 大学化学, **2024**, *39* (4), 213.
- [9] 郑凤, 原汝迅, 王晓岗. 大学化学, **2024**, *39* (10), 210.
- [10] 王丽梅. 高分子通报, **2012**, No. 9, 97.
- [11] 吴翠玲, 陈瑶, 钱浩. 高分子通报, **2016**, No. 6, 84.
- [12] 王明存, 陈贻炽, 王红山, 赵学航, 朱英. 中国教育技术装备, **2022**, No. 18, 122.
- [13] 卢嫣, 黄剑华, 陈丹青, 赵青华. 大学化学, **2022**, *37* (10), 2206010.
- [14] 王艳丽, 刘美珊, 陈宝茹, 钟耀煌, 高天明, 谭德新. 大学化学, **2023**, *38* (2), 56.
- [15] 闫毅, 颜静, 姚东东. 大学化学, **2021**, *36* (3), 2008023.