

·教学·

以聚氨酯为例开展《高分子材料研究方法》探讨式教学

犹阳 李云琦*

(贵州大学材料与冶金学院, 高分子材料与工程系, 贵阳 550025)

摘要:《高分子材料研究方法》是高分子材料与工程专业本科教育的必修课程, 在发展新质生产力的时代背景下, 针对现有课程限于表征方法及相关原理知识的碎片化问题, 将材料共性的组成-工艺-结构-性质关系这个知识系统与聚氨酯材料制备、应用和回收利用的技术体系结合起来, 构建了前沿与基础相结合的高分子材料表征方法的系统教学设计。在实际教学中, 融合思政内容的辩证法、可持续发展和新质生产力等思想, 采用探讨式教学引导学生参与翻转讨论, 激发学生的自主学习积极性, 使其熟练掌握高分子材料表征方法的核心知识和技能。该教改实践顺应发展新质生产力的时代需求, 为高分子材料研究必需的系统知识和技能教学提供了参考。

关键词: 新质生产力; 材料表征方法; 聚氨酯; 系统教学

Exploratory Teaching Practice on *Research Methods of Polymer Materials: Polyurethane Materials as Example*

YOU Yang, LI Yun-qi*

(Department of Polymer Materials and Engineering, College of Materials and Metallurgy,
Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: ‘*Research Methods of Polymer Materials*’ is a compulsory course in undergraduate education for the major of polymer materials and engineering. This teaching practice is to cultivate talents leading the development of ‘new quality productive forces’. To overcome the limitations in current forms for material characterization using variant instruments associated with fragmented principal knowledge, a systematic teaching method was proposed that integrated the general fundamental composition-processing-structure-property relationships and the preparation, application and recycling of polyurethane materials. Through exploratory teaching practice, these contents from cutting-edge researches are projected onto polymer fundamentals in both knowledge and technology aspects. Philosophy in dialectics, sustainable development and new quality productive forces are integrated through the whole exploratory teaching. Students are always encouraged to participate into flipped discussions and debates, which can motivate their subjective initiative to understand the core knowledge and critical skills engaged in polymer materials. Through this new teaching practice, a comprehensive and systematic knowledge graph for *Research Methods of Polymer Materials* will be presented, which can facilitate the training of undergraduates to adapt and lead the development needs for new quality productive forces.

Keywords: New quality productive forces; Research methods of materials; Polyurethane; Systematic teaching

2024-05-07 收稿, 2024-06-28 录用, 2024-07-15 网络出版

基金项目: 国家自然科学基金 (基金号 22173094, 52303121), 贵州大学特岗科研基金 (基金号 C0048072, X2022008), 贵州省百千万创新人才项目 (项目号 Z2024021, BQW[2024]006)

* 通信联系人: 李云琦, Email: liyq@gzu.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2024.24.139

引用: 犹阳, 李云琦. 以聚氨酯为例开展《高分子材料研究方法》探讨式教学. 高分子通报, 2024, 37(11), 1663–1669

Citation: You, Y.; Li, Y. Q. Exploratory teaching practice on *Research Methods of Polymer Materials*: polyurethane materials as example. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2024, 37(11), 1663–1669

1 引言

2023年9月, 习近平总书记在新时代推动东北全面振兴座谈会上指出: “积极培育新能源、新材料、先进制造、电子信息等战略性新兴产业, 积极培育未来产业, 加快形成新质生产力, 增强发展新动能”^[1]。2023年12月29日, 工业和信息化部等八部门联合发布了《关于加快传统制造业转型升级的指导意见》, 提出‘坚持创新驱动发展’的要求。在2024年全国两会上, 新质生产力首次被写入政府工作报告, 以材料为基础的制造业高质量发展成为了各界瞩目的焦点议题。

高分子材料贯穿在新能源、新材料、先进制造、电子信息等领域, 既覆盖了塑料、橡胶、纤维等大宗应用, 又是核心部件的关键材料。我国是高分子材料生产、消费、进出口活动最活跃的国家之一, 塑料年产量在2020年突破亿吨, 占全球总产量的28%。然而, 我国可自主生产的高分子材料存在能耗高、附加值低、良率参差不齐的问题, 高端产品高度依赖进口, 面向新质生产力发展的高分子材料行业亟需结构优化与升级迭代, 其中关键在于组建一支专业素质过硬的拔尖创新人才队伍^[2]。高等学校肩负着向社会培养输送高素质人才的责任, 在分子专业教学实践中有目的地进行课程内容设计具有必要性和紧迫性, 本文将贵州大学《高分子材料研究方法》课程为例, 探索如何实现新质生产力发展需求与分子专业教育的深度融合。

2 《高分子材料研究方法》教学现状

《高分子材料研究方法》是讲授高分子材料研究过程中, 广泛用于表征材料组分、结构、形貌、性质和动力学行为的现代仪器分析的原理、方法和表征结果分析的重要专业课程^[3-6], 面向贵州大学材料科学与工程专业的本科三年级学生开设, 共计32学时。该课程融合了高分子物理、高分子化学、有机化学、分析化学和物理化学的基础理论, 发展出了谱学分析、显微分析、力学测试、热

分析、色谱学和流变等多种表征方法。课程内容涵盖了多种物理化学相互作用、物质组成、结构和性质以及探测以上信息所用的表征信号, 构成了一套复杂理论体系。国内高校开展的课程包括《高分子材料近代测试技术》《聚合物表征测试技术》《高分子材料分析测试方法》《高分子研究方法》等均在讲授这方面的核心内容。作为一门应用性很强的课程, 它架起了基础理论与实际产品研发之间的桥梁, 为学生提供了从理论知识向实践技能转化的宝贵知识储备。该课程的宗旨在于培育学生掌握能够紧密结合生产实际的构效关系研究、分析及解决问题的能力, 面向发展新质生产力的时代需求, 笔者认为当前该课程的教学实践主要存在以下两点不足。

2.1 教学内容滞后

高分子材料常用的仪器分析技术均为发展多年的成熟技术, 当前《高分子材料研究方法》课程讲授的内容多为经典案例。然而, 随着科技的飞速发展, 与高分子材料相关的新兴理念、技术、结构和功能不断涌现^[7,8], 这些前沿动态在现行课程体系却鲜有涉及。特别是作为发展‘新质生产力’标志性驱动力的人工智能, 已有半个世纪发展历史的建模和计算模拟仿真手段, 从已知规律映射到计算机可处理的数据, 定量分析以及与生产质量控制相关的统计分析等, 完全缺乏介绍。这种脱节使得学生难以将课堂学习知识与当前科学技术前沿结合, 限制了他们对高分子材料产业改革创新的重要知识和技能积累。这种状况在分子物理、分子化学等专业课程中也普遍存在, 对分子材料与工程专业强调实践应用的教学模式构成了挑战。

2.2 原理知识点碎片化

诸多仪器分析技术在测试对象上存在交叉, 但是基础测试原理则大相径庭, 教学过程中需要将其分章节讲授。学生在学习过程中容易对交叉知识点产生混淆, 在分析科研和生产中高分子材料的特性时, 缺乏综合利用不同表征方法的理性认识。例如, 核磁共振与红外光谱都是高分子材

料化学结构解析的重要表征方法,前者用于表征特定原子核的化学环境,后者用于区分识别不同基团组成,两者的信号贡献都包括不同杂化状态原子的键和非键作用。学生在学习这两种表征方法的原理时,常对‘原子核化学环境’和‘基团组成’概念的区分和联系认识不清。与此类似的,作为高分子表征最经典的两种表征方法,流变和小角散射分析,其背后的理论完备但相应的公式较多,现在应用较广的教材在这两方面缺乏较为系统简练的知识介绍^[9~11],造成学习中需要记忆的碎片化知识点很多。如果加强物理中的一些基本概念如尺寸、密度、刚性、自由能和活化能等,将这些零散知识点串联起来对教学有极大的帮助。现实中随着仪器分析技术的发展,各类联用和原位测试技术不断涌现,如何提升教学效率,使学生在认识、理解和掌握多种表征方法的同时,能够灵活应用去分析和解决实际问题,培育专业素质过硬的人才需要不断地改革创新。

3 探讨式教学设计

高分子材料产业的新质生产力发展要面向高端化、智能化和绿色化,其中高端化主要针对我国在高端高分子原料与产品方面的不足,特别是在某些关键领域,如光刻胶、高性能聚酰亚胺、特种环氧树脂、电池隔膜和大飞机轮胎等高附加值产品,仍存在“卡脖子”问题。智能化则是针对传统高分子材料产业生产效率低下的问题,通过引入前沿信息和智能化技术,如物联网、人工智能、机器学习、理性设计等,显著提高研发和制造效率,提升产品良率和对多种产品的灵活响应性,降低生产成本,提升企业的核心竞争力。绿色化主要针对高分子材料制备和应用中的节能减排,我国塑料产品的平均全生命周期碳排放高达 $5.0 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$ ^[12],高分子材料的生产、使用和废弃处理过程中会产生大量的污染物,对可持续发展造成严重压力,实现绿色化转型,降低碳排放和环境生态成本是推动可持续发展的重要举措。

在《高分子材料研究方法》教学过程中融入面向新质生产力“高端化”“智能化”“绿色化”的相关知识体系和问题思考,涉及的知识体系已有相对成熟的参考,但知识点和前沿研究案例仍在快速更新。为了聚焦并增强教学实效,在教案设计中遵循如下原则:

(1)经典理论与前沿进展结合。围绕组成-工艺-结构-性质关系,选择典型体系和该关系中从单体结构到宏观性质多层次联系中的重要概念,如化学结构、反应性、空间和拓扑结构、链节与构象、聚集和相行为、构效关系、平衡和稳态结构,并在物质能量守恒和转变的平衡原理框架中,结合表征结果的类型示意图与实际体系的表征结果关联起来,生动讲述并引导学生参与讨论、揭秘。通过经典理论和前沿结果结合分析,引导学生思考新形势下经典理论的发展方向及其背后的深层逻辑,帮助学生融会贯通,理解不同专业课程知识。

(2)强调知识系统连续性。高分子结构和相变行为具有多层次性,在不同层面存在大量结构与性质的物理参数,这些特征参数可以用多种方法进行表征,其间的区别联系需要学生对背后的原理有清晰认识,这往往是教学的难点。以玻璃化转变温度(T_g)的测定为例,本科阶段高分子物理实验通过膨胀计法观察体积变化,用于测定高分子的玻璃化转变温度,而实际应用中以热分析法占主导,差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)和动态机械热分析法(Dynamic Mechanical Thermal Analysis, DMTA)又各有优劣,这些表征方法测定的 T_g 存在差别又有强关联。在设计案例时,可以基于玻璃化转变的基本原理,在自由体积、运动弛豫和能量耗散不同视角中观察链节运动进行讲授,从定量数据中认识高分子材料的特性。在互动环节,可以结合相互作用、链刚性、交联密度等结构特征对 T_g 影响规律展开辩论,结合前沿的案例进行讨论。

4 以聚氨酯为案例的探讨式教学实践

基于以下理由,我们选择聚氨酯作为《高分子材料研究方法》教学过程中的案例设计对象。

(1)聚氨酯因其卓越的物理、化学和机械性能,已成为世界第五大高分子材料,广泛应用于弹性体、纤维、粘合剂、密封剂、泡沫、涂料等多个领域,其制品渗透于日常生活的方方面面,如座椅填充物、隔音层、鞋底、人造皮革、电子封装等。这种广泛的应用背景为学生提供了丰富的学习素材和实践机会。

(2)聚氨酯是一种经典的双相高分子材料,通过多元醇与多异氰酸酯的聚加成反应制得,既包

含热塑性聚氨酯,也包含热固性聚氨酯,加工方式灵活多样,结构信息丰富^[13],为学生深入探讨高分子材料的构效关系提供了模型。

(3)聚氨酯的高性能化、功能化、理性结构设计以及原材料的可再生性和回收技术研究是当下研究热点,包括但不限于超强超韧聚氨酯弹性体、高性能聚氨酯复合材料、聚氨酯组分的理性设计、生物基聚氨酯、聚氨酯的物理/化学回收技术以及动态交联聚氨酯等。这些研究热点为课程提供了丰富的教学案例,有助于学生掌握高分子材料研究的最新动态和前沿技术。

在教学实践中,尝试将聚氨酯体系的组成-工艺-结构-性质特性,与新质生产力的内涵和要素联系起来,各章节的讲授内容涉及的整体关联列于表1中。在教学课程中,聚焦相互作用、化学结构和功能基团、构象、聚集和相行为、形貌及性质的多尺度因果联系,通过类比关系、自下而上(bottom up)和从上至下(top down)、上下游关系等逻辑联系,以及线性和非线性、标度关系、独立性和协同效应、正态分布和拖尾分布、平衡态和非平衡态等数学和物理关系,将真实问题投影到实验设计中。通过系统性和共性关系提取,将各种方法、原理和信号特征串联起来,有助于多种表征方法的联合运用和分析。为了巩固这些共性知识,我们将课后思考问题与课堂讨论环节相结合,引入辩论和探讨教学形式提升课堂参与度,发挥学生的主观能动性,加深对知识难点的理解。

在“绪论”章节,以聚氨酯硬质和软质泡沫、聚氨酯弹性体、聚氨酯水性涂料实物为教具,向学生介绍聚氨酯的应用,鼓励学生主动寻找生活中的聚氨酯材料制品,并向学生提出疑问:特定应用的聚氨酯材料性能需求是什么?生活中的聚

氨酯制品通常使用寿命是多久?废弃的聚氨酯材料如何处理?如何通过组分调节聚氨酯材料的力学和热学性质?这些问题可以在系统性框架下得到统一回答,在本课程核心教授内容,即组分、结构和性质表征方面,可以基于探测子、样品的相互作用以及探测信号三部分共性单元,融合多种多尺度的表征方法,如图1所示。通过梳理探测子从高能 γ 射线($E = h\nu = hc/\lambda$,其中 h 为Planck常数, C 为真空光速, ν 是频率, λ 是波长),到低能量单元的周期性应力($\tau = F/A$,胡克定律 $F = k\Delta x$,牛顿定律 $\tau = \eta\dot{\gamma}$,其中 k 是弹性系数, η 是黏度, $\dot{\gamma}$ 是形变率),将样品对探测子的透过、吸收、荧光、反射、散射、形变等过程统一起来,使学生对所有的结构和性质表征手段形成共性图像。与此同时,增加关于高分子多尺度相互作用、构象、结构和相行为的建模和计算模拟方法的教学内容,包括量子化学计算、*ab initio*从头计算和密度泛函(Density Functional Theory, DFT)计算解析薛定谔方程、分子力场和分子模拟、链构象模型和粗粒化、哈密尔顿量的构建和解析,以及有限元建模分析的科普性内容教学。通过这几方面整体知识的介绍,普及从定性到定量思维的转变,把握高分子材料中吉布斯自由能主导的结构形成机制,以及多层次复杂构效关系的表征分析方法。

围绕不同种类的聚氨酯材料的组分、结构、形貌和性质表征,在谱学标准方法部分(组分和结构),通过多元醇与多异氰酸酯反应前后的红外光谱差异来辅助说明红外光谱测试原理以及其在聚合物结构鉴定与反应过程监控中的应用。引导学生思考核磁共振谱能否实现类似的效果。在接下来的‘核磁共振谱’章节中,通过反应前后异氰酸酯/氨基甲酸酯临近碳原子以及其相连氢原子化

表1 各章节对应的聚氨酯相关特性及其与新质生产力的联系

Table 1 Correlation of polyurethanes' characteristics with new quality productive forces in each teaching sections

| 授课章节 | 聚氨酯特性 | 与新质生产力的联系 |
|---------|--|-----------------------|
| 绪论 | 聚氨酯的组成-工艺-结构-性质特点及应用场景 | 新质生产力中的数字化和智能化要素 |
| 谱学分析方法 | 聚氨酯的合成及其降解中的化学结构分析,生物基/石油基原料的结构特点 | 高分子材料的绿色化发展,多手段结合高效分析 |
| 显微分析方法 | 聚氨酯微观形貌表征,微相分离结构与相容性,相互作用与热力学成因 | 高性能材料的理性设计,数据和理论双驱动创新 |
| 力热分析方法 | 聚氨酯材料回收再利用技术,动态共价化学与固相二次加工技术,合成加工与应用的碳闭环循环 | 生产力的可持续发展思想 |
| 结构与性能关系 | 构效关系及其调控因素,结构特性和性质定量关系,组成工艺的按需设计和优化 | 高分子材料的智能制造和柔性制造 |

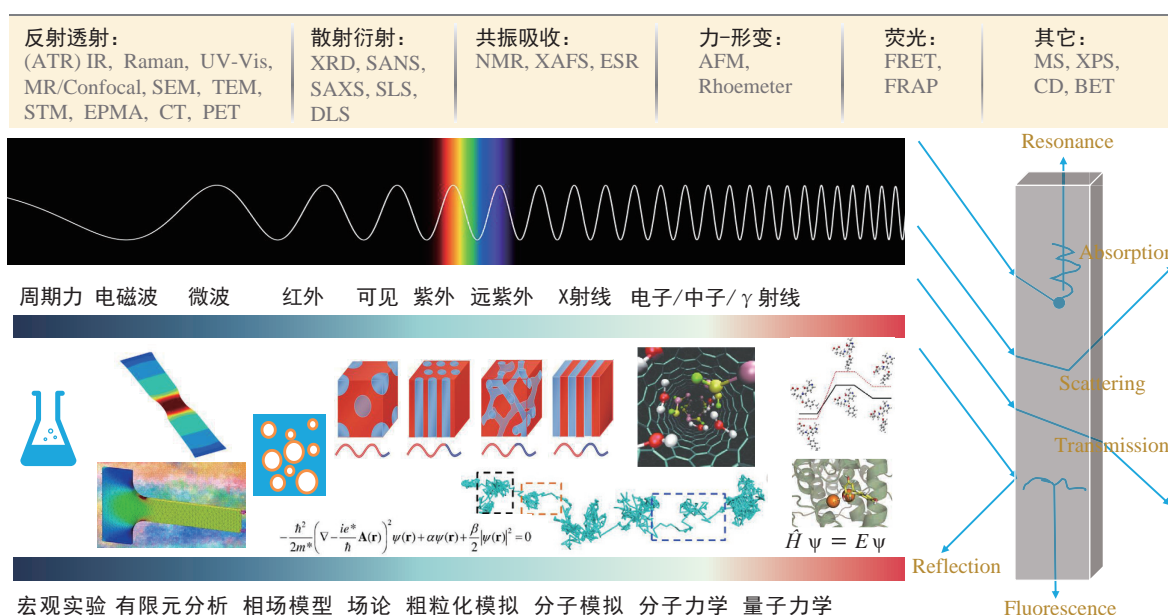


图1 高分子材料结构和性质表征、模拟方法的共性框架^[14]

Figure 1 The general frame to characterize structure and properties for polymeric materials, experimental and simulation methods at different temporal and spatial scales, specified in detectors, interactions and signals^[14]

学位移的变化来介绍核磁共振谱研究原子核化学环境的原理,并与红外光谱研究基团种类的原理比较,帮助学生厘清关键概念。向学生提出疑问:举例说明什么是生物基多元醇和石油基多元醇?它们的化学结构有何差异?如何利用红外光谱与核磁共振谱表征生物基多元醇与石油基多元醇的化学结构?如何区分生物基聚氨酯与石油基聚氨酯?这一环节的目的在于使学生了解可再生原料及材料的可持续发展的哲学思想。在“凝胶渗透色谱”和“液相色谱-质谱”章节,以聚氨酯降解产物的分子量表征为例,讲授两种表征方法在分离原理、表征对象上的差异,并回顾红外光谱与核磁共振谱的应用实例,提出疑问:从高分子一级结构角度来看,什么样的降解产物具有回收利用价值?如何通过化学降解实现聚氨酯的循环再利用?以聚氨酯的醇解和胺解产物为例说明聚氨酯化学回收的前沿进展。这一环节的目的在于引入可控降解与化学回收利用的概念以及新质生产力中的绿色化理念。

在聚氨酯材料的物理化学性质的测定环节,在DSC章节,以测定聚氨酯的玻璃化转变温度为例,介绍热分析法测定玻璃化转变温度的原理,并与热机械分析测试原理比较,帮助学生理解不同测试原理测得结果的差异以及原因。向学生提出疑问:为何聚氨酯弹性体可以观察到两个玻璃

化转变温度?分别对应的是什么微观结构?在接下里的“电子显微镜”章节中以聚氨酯相结构表征为例,介绍高分子材料微相分离与相容性概念,并引导学生查阅资料解答如何表征非均相高分子材料中的相结构以及不同相区中高分子材料降解行为的差异。

在聚氨酯材料的力学和热学分析部分,以聚氨酯弹性体、聚氨酯涂料和聚氨酯泡沫为例,讲授高分子材料的黏弹性,流变分析和“拉弯冲”等力学性质。将平台模量、熔体零剪切黏度和本征黏度的结构性质关系接合起来讲述其背后一致性的物理机制。将化学结构、拓扑结构和聚集行为不同引起的性质曲线信号的保留和变化形态联系起来(图2),揭示传统塑料和橡胶概念背后的分类依据以及典型力热性质特征与组成和聚集结构的因果关联。进一步结合特定结构的形成与破坏,讲述材料成型与回收再利用的关联,面向“双碳”目标的可持续发展设计。特别针对聚氨酯材料失效后的回收再利用提出问题:聚氨酯材料失效的力学性质特征是什么?失效的尺度与材料内部结构的关联关系如何?举例介绍聚氨酯的粉碎填充回收技术以及基于动态共价化学的二次加工成型技术,以及相应的力热性质变化。

在总结性的‘材料结构与性能关系’章节,回顾并巩固本课程所讲授的各类高分子材料表征技

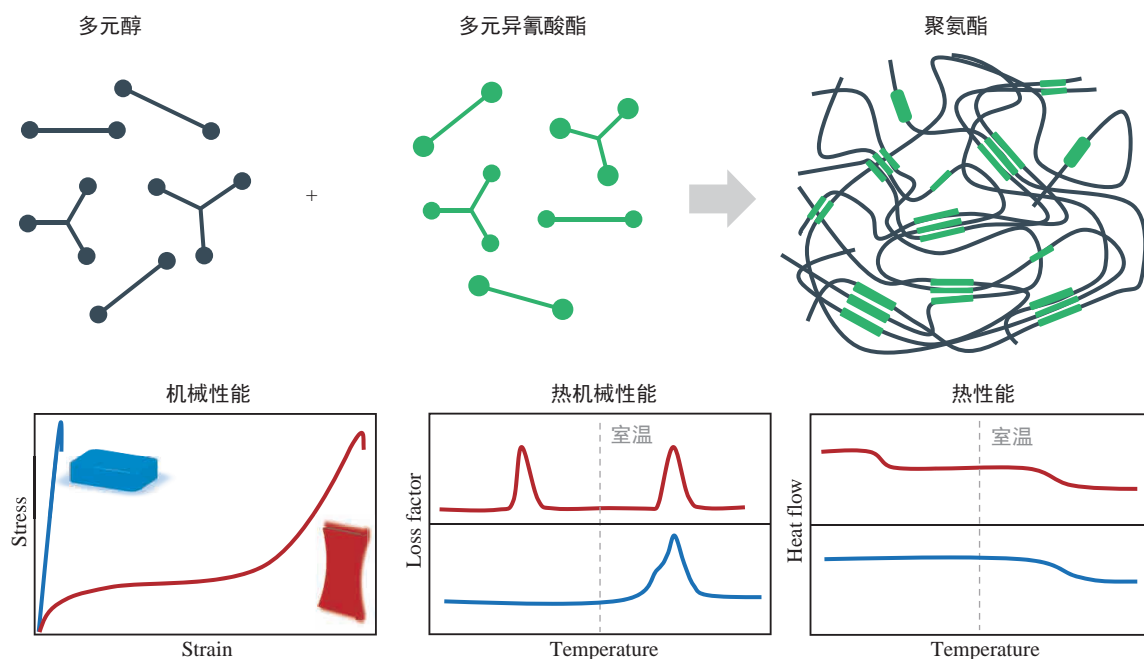


图2 聚氨酯材料的典型组成、结构以及力热性质关系示意图

Figure 2 Illustration for typical structure, mechanical and thermal properties for polyurethane materials

术。并以聚氨酯为例,探讨如何通过结构表征技术揭示其微观结构与宏观性能之间的内在联系。进一步地引发学生思考如何根据特定的性能需求进行高分子材料的理性设计,介绍材料基因组学和材料大数据的概念,以及高分子材料智能制造和柔性制造的内涵,引导学生如何通过发展新质生产力来提升高分子材料的设计、制备、应用和回收再利用的高附加值、智能化、绿色化水平。

该教学实践应特别注意学生对系统性抽象框架及其要点的掌握程度。我们主要采取了两项措施:其一是先讲共性框架,然后结合具体的几种表征方法的要点进行类比和对比,贯穿不同章节中针对不同的高分子结构和性质表征进行讲解,使学生对不同方法的利弊及其使用场景印象更加鲜明深刻。其二是实施翻转课堂的教学模式,鼓励学生根据自己的知识背景和兴趣进行自主学习、讲解和辩论,授课教师则注重共性和特色的提炼,不拘泥于某种方法的细节。这一点符合当前网络信息获取的便易和低成本性,同时激发学生根据兴趣爱好有目的地、辩证地收集整理信息的能力,加深难点和前沿热点的教学效果。

目前上述教学案例设计已开展一轮教学实践并取得了较好效果,一方面要求融合科研和时代前沿,提升了授课教师的教学科研水平,另一方面是促进了学生对复杂知识点的掌握程度,在创新

能力培养过程中激发科研兴趣。以2021级本科生为例,受新质生产力中可持续发展思想的启发,结合对高分子材料多层次结构及其构效关系相关表征技术的系统性认识,开发了一种可回收再利用纤维素水凝胶用于催化加氢并发表SCI论文一篇^[15]。学生也积极参与创新,获得挑战杯贵州省省赛一等奖一项(“秆”于创“铎”——一种安全、高效的新型储能技术)、国家级大学生创新创业训练计划项目一项(双功能聚吡咯界面层的构筑及其锌离子电池研究)。学生的反馈表明,将上述教学案例设计融入课堂促进了他们对高分子材料基本理论的理解,并增强了基础理论知识与实验操作之间的关联性认识,提升了实验设计和表征测试数据分析效率。这种教学方法不仅提高了学生的学习兴趣,也锻炼了他们将理论应用于实践的能力,有力地提升了该课程的教学质量。

5 结语

本文以《高分子材料研究方法》的探讨式教学实践为切入点,提出了面向新质生产力的教学内容案例设计方案。该方案旨在探索新质生产力与高分子专业教育的深度融合,通过在课程多个章节中系统讲授聚氨酯的结构与性能表征方法,以及相关前沿技术发展,帮助学生梳理并整合《高分子材料研究方法》教学内容中交织复杂的知识

点。此举旨在构建一个具有相关领域前沿知识背景的系统性知识体系,有效解决当前教学内容更新缓慢且知识点易混淆的问题。通过教改实践,期望为发展新质生产力培养一批具备完善知识体系,专业素质过硬的拔尖创新人才。

参考文献

- 1 新华社. 习近平主持召开新时代推动东北全面振兴座谈会强调: 牢牢把握东北的重要使命 奋力谱写东北全面振兴新篇章. *党的生活(黑龙江)*, **2023**, (9), 10-13.
- 2 周文, 许凌云. 论新质生产力: 内涵特征与重要着力点. *改革*, **2023**, (10), 1-13.
- 3 马兰超, 梁永日, 戴玉华. 基于工程教育认证理念《高分子材料研究方法》教学设计改革与实践. *高分子通报*, **2019**, (8), 65-70.
- 4 张振琳, 韩颖, 李青松, 乔琪, 刘迎丹, 彭桂荣. 新工科背景下《高分子材料研究方法》课程教学改革的探索. *高分子通报*, **2021**, (11), 81-84.
- 5 李丽霞. 将科研融入《高分子材料研究方法》教学中的探讨. *山东化工*, **2021**, 50(10), 231-232.
- 6 强娜, 解芳, 刘立芳. 《高分子材料研究方法》课程教学探析. *广东化工*, **2016**, 43(5), 213.
- 7 董建华. 我国内地高分子科学研究20年回顾: 纪念《高分子通报》创刊20周年. *高分子通报*, **2008**, (7), 1-14.
- 8 安立佳, 陈尔强, 崔树勋, 董侠, 傅强, 韩艳春, 何嘉松, 胡文兵, 胡祖明, 江明, 李宝会, 李良彬, 李林, 李卫华, 林嘉平, 吕中元, 门永锋, 沈志豪, 孙平川, 童真, 王笃金, 武培怡, 谢续明, 徐坚, 徐志康, 薛奇, 闫寿科, 杨玉良, 俞炜, 俞燕蕾, 张广照, 张军, 张俐娜, 张平文, 张文科, 赵江, 郑强, 周东山. 中国改革开放以来的高分子物理和表征研究. *高分子学报*, **2019**, 50, 1047-1067.
- 9 曾幸荣. 高分子近代测试分析技术. 广州: 华南理工大学出版社, **2007**.
- 10 陈厚. 高分子材料分析测试与研究方法, 第二版. 化学工业出版社: **2018**.
- 11 张琳, 刘志琴. 高分子材料分析技术. 北京: 化学工业出版社, **2018**.
- 12 曹淑艳, 陈雪景, 张洵洋. 中国塑料行业绿色低碳发展研究报告, **2022**, 1613-6810. <https://www.ccetp.cn/newsinfo/4697881.html>.
- 13 Cheng, B. X.; Gao, W. C.; Ren, X. M.; Ouyang, X. Y.; Zhao, Y.; Zhao, H.; Wu, W.; Huang, C. X.; Liu, Y.; Liu, X. Y.; Li, H. N.; Li, R. K. Y. A review of microphase separation of polyurethane: characterization and applications. *Polym. Test.*, **2022**, 107, 107489.
- 14 刘伦洋, 丁芳, 李云琦. 高分子材料大数据研究: 共性基础、进展及挑战. *高分子学报*, **2022**, 53(6), 564-580.
- 15 Li, H. R.; Zhu, X. Y.; He, T. L.; Qu, C. X.; Tian, Q. L.; Xie, H. B.; Hu, L. J.; Liang, S. M.; Zhang, L. H.; Yuan, J. L. Hydrophilic-hydrophobic regulation of the cellulose suspending ionic liquid hydrogel/palladium nanocomposite catalyst for hydrogenation. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **2024**, 12(14), 5390-5401.