高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

教育与教学 / Education DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26367

“双碳”背景下类玻璃高分子前沿融入“高分子化学与物理”合开课的教学实践

冯夏明* 黄金凤 杨宏宇

(重庆大学材料科学与工程学院 重庆 400044)

摘 要 “高分子化学与物理”合开课存在化学与物理知识体系割裂的共性问题，学生难以建立完整的构效关联逻辑，热塑性/热固性二元分类框架易形成固化认知。“双碳”战略驱动可回收动态交联材料快速发展，类玻璃高分子依托缔合型动态共价键可实现网络拓扑可逆重构，相关内容已纳入新版《高分子化学》教材。本研究以类玻璃高分子为教学主线构建分阶段跨章节教学方案，于体型缩聚章节讲解动态交联分子设计思路，在黏弹性模块解析其独特的松弛动力学规律，课程末期设置专题研讨完成知识体系整合。依托材料类本科课程开展完整教学实践，结合2届课程成绩对比、课堂观测等综合分析教学成效。结果表明，该教学模式可打通两大知识模块，有效降低成绩离散度、消除挂科现象，同步渗透绿色材料育人导向，拓宽学生对高分子材料的认知边界，为同类课程前沿内容融入提供可落地的实施方案。

关键词 “双碳”战略；类玻璃高分子；“高分子化学与物理”课程；跨章节教学；动态共价键

Teaching Practice on Integrating Frontier Vitrimer Knowledge into “Polymer Chemistry and Physics” Combined Course under the “Dual Carbon” Strategy

Xia-ming Feng*, Jin-feng Huang, Hong-yu Yang

(*College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044*)

Abstract The combined course of “Polymer Chemistry and Physics” commonly suffers from the separation of chemical and physical knowledge systems, which prevents students from establishing a complete logical understanding of structure-property relationships. The binary classification framework of thermoplastics and thermosets tends to form rigid cognitive stereotypes. Driven by the “Dual Carbon” strategy, recyclable dynamically crosslinked materials have achieved rapid development. Vitrimers can realize reversible network topological rearrangement based on associative dynamic covalent bonds, and relevant content has been incorporated into the new edition of the *Polymer Chemistry* textbook. Taking vitrimers as the main teaching thread, this paper constructs a phased cross-chapter teaching scheme. The molecular design strategy of dynamic crosslinking is explained in the chapter on three-dimensional polycondensation, and the unique relaxation kinetic behavior of vitrimers is analyzed in the viscoelasticity module. Special seminars are arranged at the end of the course to integrate the knowledge system. Complete teaching practice has been carried out in undergraduate materials courses, and teaching effects are comprehensively analyzed by comparing academic performance data of two cohorts and classroom observations. The results show that the proposed teaching mode connects the two major knowledge modules, effectively reduces the dispersion of scores and eliminates course failure. Meanwhile, it incorporates the educational concept of green materials, broadens students’ cognitive boundary of polymer materials, and provides implementable schemes for

2026-08-04 收稿, 2026-09-10 录用

基金项目: 重庆市高等教育教学改革研究一般项目(项目号 253030); 重庆大学2024年本科教育教学改革研究项目教师教学发展专项(项目号 2024JF12)

* 通信联系人: 冯夏明, E-mail: fengxm@cqu.edu.cn

integrating cutting-edge advances into similar courses.
Keywords “Dual Carbon” strategy; Vitrimers; “Polymer Chemistry and Physics” course; Cross-chapter teaching; Dynamic covalent bonds

引用: 冯夏明, 黄金凤, 杨宏宇. “双碳”背景下类玻璃高分子前沿融入“高分子化学与物理”合开课的教学实践. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26367

Citation: Feng, X. M.; Huang, J. F.; Yang, H. Y. Teaching practice on integrating frontier vitrimer knowledge into “Polymer Chemistry and Physics” combined course under the “Dual Carbon” strategy. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26367

“高分子化学与物理”是材料类专业必修核心基础课程，教学内容划分为高分子化学和高分子物理两大独立板块。常规授课中，聚合反应与交联反应机理、链运动与黏弹性等内容分属不同板块讲授，两部分知识缺少有机衔接。相当一部分学生难以自发建立分子结构与宏观性能间的因果关联，结构决定性能往往停留在结论记忆层面。该教学短板在交联高分子部分体现尤为突出，传统授课仅介绍永久交联体系，缺少可同步串联交联分子设计、网络松弛行为的综合性教学案例，知识碎片化易导致学生在综合题型中大面积失分，出现成绩两极分化。

在“双碳”目标驱动下，国家发展改革委、生态环境部明确提出推动塑料废弃物再生利用的要求[1]，热固性树脂因永久交联而难以高效回收，成为行业共性难题。动态共价交联和类玻璃高分子成为该领域的重要解决方案，潘祖仁主编《高分子化学》(第6版)已增设动态化学交联、类玻璃高分子相关内容[2]。教材更新后，一线教学普遍面临学时受限、缺少适配合开课的一体化教学方案等现实问题。

梳理现有教学改革文献可分为2类：其一为类玻璃高分子综合实验设计类研究，仅聚焦样品制备与性能测试实操，未开展理论课堂分层递进教学；其二为“高分子化学与物理”合开课改革研究，多选用通用聚烯烃、传统橡胶作为教学载体，未引入动态共价体系搭建跨章节教学逻辑[3,4,5]。现有文献尚未以类玻璃高分子为线索，打通体型缩聚、黏弹性两大核心章节开展一体化理论教学设计，且缺少结合课程成绩数据的实证分析，存在明确研究缺口。

本研究以重庆大学材料科学与工程专业建筑材料方向“高分子化学与物理”合开课为实践载体，围绕“双碳”背景下绿色材料人才培养需求构建三段式跨章节教学流程，系统阐述各阶段授课要点、课堂互动设计与综合研讨实施方案，结合2届课程成绩数据，配合课堂观测等综合分析教学效果，为同类课程融合动态高分子前沿内容提供可复制的教学思路。

1 类玻璃高分子的科学内涵与教学价值

1.1 动态共价键与交联网络拓扑重构机理

类玻璃高分子具有缔合型动态共价自适应网络，图1直观呈现了其核心结构、网络演变与宏观性能特征。以环氧–酸酐–催化剂体系为例，交联网络中的酯键与醇羟基在高温下持续发生酯交换反应，共价键的断裂和生成过程同步进行，交换全程网络的交联密度基本保持不变，该特征是区分其与 Diels-Alder 等解离型动态交联网络的核心依据[6]。解离型网络升温过程中动态共价键先行解离断裂，交联密度显著下降，材料明显变稀流动。类玻璃高分子依托同步交换机制，交联网络骨架保持完整，可在实际应用中维持基本的固态形状。

动态交换反应动力学符合阿伦尼乌斯方程，反应活化能决定键交换的温度敏感性。宏观层面材料应力松弛时间与键交换速率呈负相关，因此类玻璃高分子的黏度–温度关系遵循阿伦尼乌斯规律。常规热塑性高分子高于玻璃化转变温度(T_g)后，松弛行为由链段热运动主导，黏度变化满足WLF方程，2类动力学规律的对比是串联化学、物理知识点的核心切入点[7~9]。张希针对动态共价键化学开展了系统性综述，明确了缔合与解离网络的划分标准，可为本章节教学内容提供理论支撑[10]。

1.2 拓扑冻结转变的教学意义

拓扑冻结转变温度T_v用于定量表征动态交联网络的松弛特性，该参数不属于热力学相变温度，为依赖测试时长的动力学特征量，是动态交联网络交换反应显著加速或减缓的临界温度[7,8]。环境温度远低于T_v时，键交换速率极低，材料呈现弹性固体特征。温度接近或高于T_v时，网络具备持续应力松弛与热重塑能力。课堂可将T_v与T_g对照讲解，区分动力学参数与热力学转变的定义差异。单体分子、催化剂添加量等可同步调控T_g与T_v，直观体现分子结构对材料特征温度的调控作用。WLF方程对应的链段松弛理论收录于经典高分子物理专著与教材[11,12]，将其与类玻璃

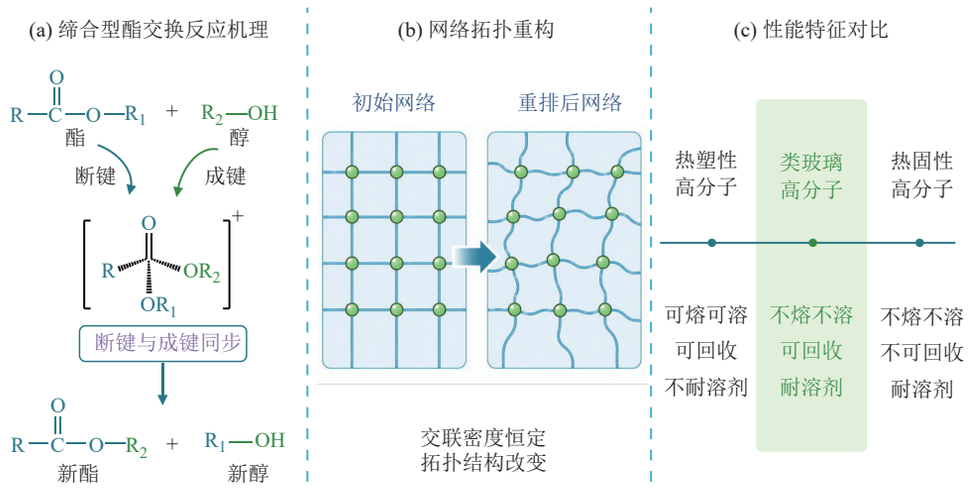

图 1 类玻璃高分子的结构与性能特征示意图: (a)缔合型酯交换反应机理; (b)网络拓扑重构与交联密度恒定特征; (c)与传统热塑性、热固性高分子的性能对比

Fig. 1 Schematic diagram of structure and performance characteristics of vitrimers: (a) Associative transesterification mechanism; (b) Network topological rearrangement and constant crosslinking density feature; (c) Comparison of properties with traditional thermoplastic and thermosetting polymers

高分子阿伦尼乌斯型松弛行为对比，可实现新旧知识点对照辨析，降低学生理解难度。

1.3 完善高分子材料分类认知体系

本科教学对高分子材料普遍采用热塑性或热固性二元分类框架，该划分方式简洁，但易形成交联结构不可二次加工的固化认知。类玻璃高分子可填补2类材料的认知空白，其分子层面具备完整交联网络，材料不溶不熔、尺寸稳定性优异；高温下依托动态键交换实现重塑、修复与回收，同时兼具热塑性材料可反复加工的特征，对应图1(c) 的性能定位。van Zee 等综述明确了类玻璃高分子永久交联、拓扑可重构的核心属性[9]。将该体系纳入课堂并非否定传统分类，而是对认知框架进行拓展，引导学生理解高分子材料性能可通过分子键合方式动态调控，破除二元对立的片面思维。

1.4 “双碳”导向工程应用与课程思政价值

环氧地坪、碳纤维复合加固材料、建筑防水聚氨酯等均为典型热固性建材，永久交联结构造成废旧材料回收困难，与“双碳”战略资源循环利用要求相悖。类玻璃高分子通过分子层面引入动态共价网络结构，在保留交联材料力学、耐久性能的基础上赋予可回收特性，契合绿色材料发展方向。

面向建筑材料方向本科生开展该内容教学，可同步融入资源循环、低碳化工相关思政元素，实现知识传授与价值引领统一。教育部本科教育提升文件明确要求强化新工科人才可持续发展理念培育[13]。该材料可构建完整逻辑链条，从动态键选型、催化剂与交联密度调控到网络松弛动力学和工程回收应用，有效解决学生构效关系认知碎片化问题。

对比各类动态共价高分子，类玻璃高分子适配跨章节教学需求。缔合交换机制可与传统热固性树脂直接对照，黏度-温度规律便于和WLF 方程辨析，应用场景贴合建筑材料专业培养方向，是串联两大知识模块、落实“双碳”育人目标的优质教学载体。

2 跨章节教学设计的逻辑与思路

常规教学易形成割裂认知：高分子化学侧重分子合成路径，高分子物理侧重结构与性能表征，2类知识互不印证。类玻璃高分子可打破该边界，实现化学与物理双向推导。依托单体分子、催化剂等化学变量可预判材料松弛、流变行为；借助应力松弛、动态力学测试等物理表征，可反向推导共价键交换活化能。课程末期设置逆向材料设计研讨，学生需同步调用交联合成、黏弹性2类知识点，逐步建立一体化高分子分析思维。

本教学设计融合建构主义与螺旋式教学理论，同步契合OBE 成果导向与“双碳”人才培养要求。螺旋式教学核心为同一教学载体分阶段、分层级递进讲解：第一阶段聚焦低阶认知，掌握动态交联网络合成逻辑；第二阶段深化中阶认知，明晰黏弹性行为的化学根源；第三阶段达成高阶认知，结合循环回收需求完成材料综合设计。全程以构建完整构效逻辑、形成绿色高分子综合分析能力为育人目标反向设计教学内容、课堂任务与研讨议题。

现有教改文献多采用单章节案例授课模式，缺少分阶段分层融合设计方案[3,14]。本研究三段式教学内容嵌入原有授课体系，无需压缩常规知识点学时，总授课时长3.5 h，适配64学时标准合开课安排：(1)体型缩聚拓展模块。动态交联网络分子设计(1 h)；(2)黏弹性拓展模块。动态网络松弛行为解析(1 h)；(3)课程末期专题研讨。正向机理分析与绿色材料逆向设计(1.5 h)。各阶段设置梯度思考题，前后内容相互铺垫呼应，逐步消解两大知识模块的割裂问题。整体教学设计逻辑框架如图2所示。

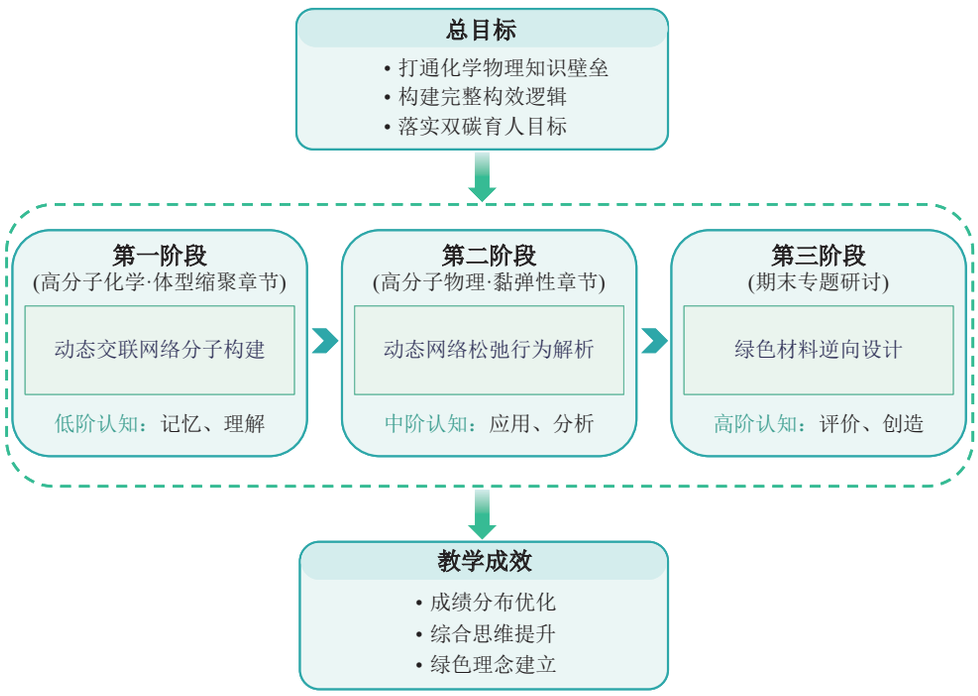

图 2 类玻璃高分子的跨章节教学设计框架图

Fig. 2 Framework diagram of cross-chapter teaching design for vitrimers

3 分阶段跨章节教学内容安排

3.1 高分子化学部分：动态交联网络的分子构建

本部分设置于体型缩聚、凝胶点内容讲授完毕后，以“双碳”背景下热固性高分子建材固废处置为工程导入场景，提出核心问题：交联网络具备可逆重组特性是否可解决热固性树脂无法回收的行业痛点，由此引入动态共价键与类玻璃高分子概念。课堂核心任务为区分永久交联网络和共价自适应网络，依托分子动态动画演示环氧–酸酐体系同步断键、成键过程，直观阐释交联密度恒定、网络拓扑可重组的内在机制。以环氧–酸酐催化体系为典型案例，拆解分子调控思路：单体分子同步影响T_g与动态键反应活性，交联密度决定材料常温物性，催化剂种类与添加量调控键交换速率。

随堂思考任务为对比永久交联环氧树脂与酯交换型环氧类玻璃高分子的分子结构，从交联键、催化剂、特征基团差异说明二者加工、回收性能区别。课程末尾设置内容伏笔，该动态网络的温度依赖规律将在黏弹性章节深入分析，建立章节衔接。该节的教学目标是区分2类共价交联网络，掌握类玻璃高分子的基础分子设计思路，可结合材料回收需求初步筛选动态共价键类型。

3.2 高分子物理模块：动态网络黏弹性的化学本质

本部分间隔数周后授课，嵌入黏弹性章节，开篇回顾类玻璃高分子化学结构，提出对比问题：同属交联高分子，类玻璃高分子具备高温塑性回收能力，硫化橡胶仅发生弹性形变，二者内在机理差异是什么。教学核心对比2类高分子松弛动力学：常规热塑性高分子松弛由链段热运动主导，遵循WLF方程；类玻璃高分子松弛由共价键交换反应驱动，满足阿伦尼乌斯方程，二者松弛驱动力存在本质区别。课堂展示实测多温度应力松弛曲线，指导学生读取松弛时间并估算酯交换活化能，将抽象动力学理论与实测数据结合。同步阐释拓扑冻结转变温度T_v的测试定义，区分其与T_g的热力学/动力学属性差异，梳理T_g、T_v协同调控材料使用、加工窗口的作用。

随堂要求学生思考为什么提升催化剂用量会加

快酯交换速率，分析松弛时间、T_v的变化规律，并从化学动力学角度解释该调控对热固性树脂回收的作用。教学的目标是明晰类玻璃高分子黏弹性核心机理，区分WLF与阿伦尼乌斯方程适用场景，建立分子动态键、松弛动力学、宏观形变及回收性能的完整逻辑链。

3.3 期末专题研讨：知识整合与绿色材料综合应用

研讨课安排于高分子物理主体内容完成后，50人班级划分为10个小组，采用独立思考、小组讨论、汇报点评3个环节实施。研讨议题分为正向机理分析、逆向工程设计2类，梯度设置，覆盖全章节核心知识点并紧扣“双碳”回收主题。议题1(正向分析)：提高催化剂添加量可加快环氧类玻璃高分子应力松弛速率，分别从高分子化学、高分子物理两层机理完整解释该现象，并分析其在废旧环氧建材资源化中的应用价值。议题2(逆向设计)：面向建筑碳纤维加固场景，环氧树脂需满足常温尺寸稳定、服役期满可无损回收碳纤维的“双碳”循环要求，合理选取动态键类型、交联密度及化学回收条件，并阐释各参数对应的材料性能与回收优势。

教师点评重点梳理化学参数与物理性能的因果关联，纠正单一维度分析思路，重点讲解动态交换速率与常温抗蠕变性能的平衡关系，引导学生辩证权衡材料使用性能与可回收性。主要目标是使学生整合动态交联、黏弹性核心知识点，具备基于工程回收需求开展动态交联高分子逆向设计的综合能力。

4 教学实施效果与讨论

选取同一任课教师授课的2届平行班级作为分析对象：2024~2025 学年班级采用传统教学模式(对照组，55 人)，2025~2026 学年班级实施类玻璃高分子跨章节教学(改革组，50 人)。2届课程核心教学大纲、考核方式和考察标准基本一致。高分子化学教材分别为潘祖仁《高分子化学》第5版和第6版，高分子物理教材一致，均为华幼卿、金日光主编的《高分子物理》第5版。2届期末试卷在交联与黏弹性模块的考点一致，相关试题在试卷总分中的占比基本相当。在此基础上，成绩数据可作为教学效果的参考依据之一，本研究同时结合课堂观测进行综合判断。

4.1 2届课程成绩对比分析

2届课程成绩分布统计如表1所示。从成绩数据可得出3点结论：第一，不及格现象消除，成绩离散度明显缩小。改革组无60分以下学生，不及格率从4.0%降至0；最低分从46分提升至61分，成绩全距从48缩小至33。这一变化与教学设计目标相吻合，传统教学中化学、物理知识割裂，学生难以建立完整知识体系，在交联、黏弹性等题型中易失分。跨章节教学通过类玻璃高分子案例串联两大模块知识点，帮助中下游学生理清构效关系逻辑，有效减少了因知识碎片化导致的低分段。从模块得分率看，2届交联与黏弹性模块的得分率基本相当，改革组略高于对照组。考虑到改革组在该模块的题型构成上更为严格，这一结果说明成绩分布的改善并非以降低考查要求为代价。第二，中高分段占比基本持平。改革组80分以上学生占比为47.1%，与对照组的46.0%相当。结合第一点低分段收缩的变化来看，此次教学改革的主要效益在于托底，帮助基础薄弱学生跨越及格线、建立知识关联。3.5学时的拓展教学对成绩较好学生的笔试拉动有限，研讨课侧重开放性综合设计，其训练目标与笔试中规整的解题要求之间存在一定距离，这可能是研讨表现未充分转化为笔试分数提升的一个原因。第三，整体考核难度保持稳定。2届课程平均分仅相差0.11分，基本持平，说明教学改革未以降低考核要求、简化试卷难度为代价，而是在同等考核标准下优化了成绩分布，提升了班级整体知识掌握的均衡性。

表 1 2届课程成绩分布对比

Table 1 Comparison of assessment scores in two-year course teaching

分数段/指标	对照组(N=55)		改革组(N=50)	
	人数(人)	占比(%)	人数(人)	占比(%)
＜60	2	4.0%	0人	0
60~69	4	8.0%	7人	14.2
70~79	21	42.0%	19人	38.7
80~89	22	44.0%	22人	44.8
90~100	1	2.0%	1人	2.3
平均分	77.60	—	77.49	—
成绩全距	48	—	33	—
模块得分率(%)	57.2	—	59.4	—

4.2 课堂互动与试卷作答佐证

从课堂互动来看，跨章节教学实施后，交联与黏弹性相关内容的课堂提问深度有所提升。传统授课阶段学生提问多集中于凝胶点计算等识记型知识点，引入类玻璃高分子案例后，学生能够结合工程应用场景开展关联性思考，在专题研讨中可自主识别动态键交换速率与材料尺寸稳定性的设计权衡，综合分析思维逐步形成。结合期末试卷整体作答情况

分析，交联高分子综合类题目中，单一知识点孤立作答的占比有所下降，多数学生能够建立分子结构参数与宏观松弛行为的对应逻辑，答题的系统性与连贯性有所改善，与成绩分布中低分尾部消除、中高分段整体稳定的趋势相吻合。

4.3 教学局限与优化路径

4.3.1 现有教学模式的局限性

第一，教学实施存在学科背景门槛，授课教师需系统掌握类玻璃高分子相关成果，方可结合实验数据、产业案例完成研讨课答疑，无相关研究基础教师实施难度较高。

第二，理论与实验教学脱节，本次仅完成理论课堂教学设计，未配套开发对应综合实验项目，学生缺少树脂合成等实操环节，对材料回收性能的认知仅停留在理论层面。

第三，评价体系尚不健全，目前教学效果主要依托期末成绩与课堂观测评价，未建立标准化全过程考核机制，评价维度较为单一。

4.3.2 后续完善方案

针对上述局限提出对应改进路径：一是搭建标准化教学资源包，整合授课课件、分子交换动画、梯度研讨题库、“双碳”产业案例，降低一线教师备课门槛；二是配套开发类玻璃高分子综合实验，覆盖树脂合成、应力松弛表征、热重塑回收测试，实现理论与实验一体化教学；三是完善多元考核体系，将小组研讨报告、课堂思考题纳入平时成绩，使研讨课中展现的综合设计能力在课程总评中得到合理体现，构建过程考核与期末笔试相结合的综合评价机制，重点考核绿色材料综合设计能力。

5 结论

针对“高分子化学与物理”合开课化学与物理知识体系割裂、交联高分子章节缺少综合教学载体的共性问题，本研究以类玻璃高分子为贯穿素材，构建了体型缩聚分子设计、黏弹性行为解析、期末综合专题研讨三段式跨章节教学方案，将前沿科研内容有机嵌入原有课程体系，无需额外增加大量学时。2届班级的教学实践对比表明该教学模式可有效打通两大知识模块的壁垒，帮助学生建立完整的构效关系逻辑，显著降低成绩离散度，同时拓宽学生对高分子材料分类的认知边界。教学过程同步融入“双碳”战略与绿色材料理念，实现了知识传授与价值引领的统一。

本教学模式具备较强的可迁移性，后续可将跨章节串联的思路拓展至可降解高分子等更多绿色前沿方向，进一步丰富课程的前沿性与时代性。同时可对接新工科人才培养要求，完善理论与实验一体化的教学体系，构建多元过程性评价机制，为材料类专业核心课程的科教融合改革提供更系统的实践支撑。

参 考 文 献

1 国家发展改革委 生态环境部关于印发“十四五”塑料污染治理行动方案的通知. (2021-09-08) [2026-08-04] https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/16/content_5637606.htm.

2 潘祖仁. 高分子化学. 6版. 北京: 化学工业出版社, **2025**.

3 黄丽婕, 黄崇杏, 刘杨, 赵辉, 段青山. 新工科背景下包装工程专业高分子化学与物理的课程改革. 包装工程, **2020**, 41(S1), 70−72.

4 阮芳涛, 王洪杰, 徐文正, 徐珍珍, 杨莉. 工程教育背景下纺织工程专业“高分子化学与物理”课程建设探索. 纺织服装教育, **2024**, 39(5), 35−40.

5 孙璐璐, 万雨卓, 高明星, 肖明月, 李相元, 冯岸超, 张立群. 面向可持续发展的高分子科学教学实验设计: 含席夫碱型动态共价键的可修复热固性材料的制备与表征. 高分子通报, **2023**, 36(4), 521−528.

6 Kloxin, C. J.; Bowman, C. N. Covalent adaptable networks: smart, reconfigurable and responsive network systems. *Chem. Soc. Rev.*, **2013**, 42(17), 7161−7173.

7 Montarnal, D.; Capelot, M.; Tournilhac, F.; Leibler, L. Silica-like malleable materials from permanent organic networks. *Science*, **2011**, 334(6058), 965−968.

8 Capelot, M.; Unterlass, M. M.; Tournilhac, F.; Leibler, L. Catalytic control of the vitrimer glass transition. *ACS Macro Lett.*, **2012**, 1(7), 789−792.

9 van Zee, N. J.; Nicolaÿ, R. Vitrimers: permanently crosslinked polymers with dynamic network topology. *Prog. Polym. Sci.*, **2020**, 104, 101233.

10 张希. 可多次塑型、易修复及耐低温的三维动态高分子结构. 高分子学报, **2016**, (6), 685−687.

11 Ferry, J. D. *Viscoelastic Properties of Polymers*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, **1980**.

12 华幼卿, 金日光. 高分子物理. 5版. 北京: 化学工业出版社, **2013**.
13 教育部关于加快建设高水平本科教育全面提高人才培养能力的意见. (2018-10-08) [2026-08-04]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201810/t20181017_351887.html.
14 仝维鋆, 李寒莹, 张兴宏, 刘建钊, 吴子良. 科教融合的《高分子材料设计与实践》课程的建设探索. 高分子通报, **2025**, 38(3), 504−508.