高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

教育与教学 / Education

DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26261

科教融合视域下高分子实验课程的全流程科研训练模式探索
——以无色透明聚酰亚胺薄膜的结构设计与性能为例

李琇廷　许青松*　相恒学　张清华

(东华大学　先进纤维材料全国重点实验室　材料科学与工程学院　　上海 201620)

摘　要　针对“高分子综合实验”课程在学生自主探究空间和科研思维训练方面的不足，以“柔性显示无色透明聚酰亚胺薄膜的结构设计与性能”课程为载体，将电荷转移络合效应抑制策略与结构–性能调控这一前沿科研问题转化为本科实验教学项目，构建了分子结构设计—样品制备—性能表征全流程自主探究模式。课程不设统一配方，学生围绕单体选择、亚胺化方式和热处理气氛等变量自主设计方案，完成薄膜制备与构效分析。课程评价结合实验记录、实验报告和汇报答辩，同步建立基于OBE理念的多元评价与持续改进闭环。实践表明，该模式提升了学生对科研训练过程的参与度和认可度。2024和2025年本课程问卷结果显示，学生对学习效果“非常好/较好”的评价从57.14%升至85.71%，认为动手操作促进知识掌握的比例从71.43%升至100%。部分学生将课程探索延续为毕业论文或后续研究，形成教学—科研贯通的培养通道，为高分子实验课程从操作技能训练向科研能力培养的延伸提供了实践参照。

关键词　科教融合；全流程科研训练；高分子实验课程；无色透明聚酰亚胺

Exploration of a Full-Process Research Training Model for Polymer Laboratory Education under Research-Education Integration
—A Case of Structure-Property Relationships of Colorless Polyimide Films

Xiu-ting Li, Qing-song Xu*, Heng-xue Xiang, Qing-hua Zhang

(*State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, College of Materials Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620*)

Abstract　To enhance independent inquiry and scientific thinking training in the “Comprehensive Polymer Experiments” course, an experimental teaching project based on the structure design and properties of colorless transparent polyimide films for flexible displays was developed. The frontier research topics of charge-transfer complex suppression and structure-property regulation were incorporated into undergraduate laboratory teaching, and a full-process inquiry-based teaching framework covering molecular design, sample preparation, and performance characterization was established. An inquiry-based teaching model spanning molecular structure design, sample preparation, and property characterization was established. Rather than providing a fixed formulation, the course guided students to design their own experimental schemes by considering variables such as monomer selection, imidization method, and heat-treatment atmosphere, and to carry out film preparation and structure-property analysis. Course assessment integrated laboratory records, experimental reports, and oral presentations, while a closed-loop mechanism for multidimensional evaluation and continuous improvement was developed based on outcome-based education. Teaching practice showed that this model enhanced students’ engagement with, and appreciation of, research-oriented training. Questionnaire results from 2024 and 2025 showed that the proportion of students rating the learning

2026-05-26 收稿, 2026-07-20 录用

* 通信联系人: 许青松，E-mail: qsxu@dhu.edu.cn

outcomes as “very good” or “good” increased from 57.14% to 85.71%, while the proportion agreeing that hands-on experimentation facilitated their mastery of course knowledge increased from 71.43% to 100%. Some students further developed their course projects into undergraduate thesis work and subsequent innovation projects. The proposed approach provides a useful reference for shifting polymer laboratory education from conventional skills training toward research-oriented learning.

Keywords Research-education integration; Full-process research training; Polymer laboratory education; Colorless transparent polyimide

引用: 李琇廷, 许青松, 相恒学, 张清华. 科教融合视域下高分子实验课程的全流程科研训练模式探索：以无色透明聚酰亚胺薄膜的结构设计与性能为例. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26261

Citation: Li, X. T.; Xu, Q. S.; Xiang, H. X.; Zhang, Q. H. Exploration of a full-process research training model for polymer laboratory education under research-education integration: A case of structure-property relationships of colorless polyimide films. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26261

新工科建设与卓越工程师教育培养计划2.0对材料类专业实验教学提出了更高要求：学生不仅要会做实验，还要能围绕复杂材料问题提出方案、判断结果并持续改进。东华大学材料科学与工程学院高分子材料与工程专业长期设有卓越工程师班，同时依托先进纤维材料全国重点实验室，在高性能纤维、聚酰亚胺材料等方向积累了较好的科研基础。如何把这些科研资源转化为本科生能够参与、能够理解、能够完成的实验课程，是本课程改革的出发点[1]。

本科四年级是实现上述目标的关键窗口期。学生在前3年已完成高分子化学、高分子物理等核心课程学习，进入大四后，能力培养重心需从“知识习得”转向“知识整合与创造”，为毕业设计和后续发展奠定科研思维基础[2]。实验教学在这一进阶中具有不可替代的作用。大四综合实验课程应让学生在近似真实科研的情境中经历从问题识别、方案设计到结果分析的完整研究闭环。当前多数高校的高分子课程尚未充分回应这一诉求[3,4]。

1 高分子综合实验课程现状与改革思路

1.1 现实困境

从上述培养目标审视，当前不少高校的高分子综合实验课程在内容、模式和训练深度上仍有改进空间。

在教学内容上，已有高分子综合实验改革多围绕“烯烃聚合”“共混或复合改性”“静电纺丝”等内容展开，较好地体现了高分子材料的制备、加工与性能表征特点，但多数仍以既定材料体系和成熟工艺路线为基础，学生的训练侧重于配方调整、工艺对比和性能测试。近20年来高分子学科在柔性显示、高性能纤维、生物医用材料等领域进展显著，而实验课堂与这些前沿的关联尚不够紧密，在一定程度上影响了学生对学科发展动态的感知和探索兴趣。在教学模式上，不少课堂形成了讲义预设配方步骤、教师示范、学生按指令操作、报告模板化完成的固定流程。这一模式在基础阶段有其合理性，但延续至大四阶段，学生独立判断和自主决策的环节则显不足。在科研训练上，高分子材料研发涵盖“需求分析→分子设计→合成制备→性能表征→构效关系分析”的完整链条。受课程体系和学时等因素制约，上述环节常被分散在不同教学单元中，学生较少有机会经历从设计构思到性能评价的全过程。科研思维的养成并非单项技能的简单累加，各环节间的联系若未能充分呈现，贯通性的思维能力也未必能自然形成。在与产业应用场景关联上，学生在实验中制备的产物，与实际应用场景之间的关联并不十分明确，学习过程缺少真实问题赋予的意义感，进而影响深入探究的内在动力[5~7]。

上述问题共同反映出实验教学与科研活动、产业需求之间的融合深度尚显不足。如何将优质科研资源有效转化为教学资源，在夯实基本技能训练的同时实现从“内容更新”到“思维培育”的递进，是课程改革亟待探索的课题。

1.2 科教融合促进科研思维内化

针对上述困境，科教融合提供了一条值得探索的解决路径。近年来，部分高校已开始将前沿科研成果引入本科实验教学。如苏州科技大学将聚苯胺化学合成实验改进为电化学合成法，将其从验证性实验转变为创新设计实验[8]；江南大学围绕聚乳酸立构复合等成果开发了“透明耐热聚乳酸膜材料的制备及表征”综合实验[9]；南京大学让学生体验电化学方法在有机合成中的应用[10]。这些探索在教学内容的前沿性上取得了明显进展。

不过，科研内容进入课堂并不等于学生真正经

历了科研。若仍由教师给出方案、学生按步骤操作，即便实验素材取自前沿课题，训练效果仍停留于操作层面。本课程更关注的问题是：能否让学生在有限学时内，从文献调研和设计思路出发，自主确定实验方案，通过数据验证自己的判断，经历一次相对完整的探究过程。

基于上述分析，本研究以东华大学材料科学与工程学院大四卓越高分子开设的“先进综合实验——柔性显示用无色透明聚酰亚胺薄膜的结构设计与性能测试”为实践载体，依托笔者所承担的科研项目，探索从“科研成果进课堂”到“科研思维进学生”的转化路径。

2 课程改革的理念与设计

2.1 课程目标

本课程目标从3个维度设定。在知识维度上，掌握无色透明聚酰亚胺的电荷转移络合(CTC)效应显色机理与分子设计策略，理解聚合物结构–性能关系。在能力维度上，经历从文献调研、方案设计、实验制备、性能表征到数据分析与成果汇报的完整科研闭环。在价值维度上，在真实科研情境中建立专业认同感与科研志趣。

2.2 “三化”改革框架

本研究提出“科研内容教学化、教学过程科研化、学生角色研究员化”的改革框架。

科研内容教学化，就是将科研项目中的“创新点”转化为教学“知识点”，将科研问题的“开放性”转化为学生可以自主探索的“可能空间”。以本课程为例，无色透明聚酰亚胺(CPI)的CTC效应抑制策略包含多条路径，不存在唯一标准答案，每位学生需自行判断并选择探索方向，形成差异化方案。教学过程科研化，就是按照科研活动的推进逻辑组织教学流程，将问题提出、文献调研、方案设计、实验实施、数据分析、成果凝练等环节整体纳入教学设计，使教学流程覆盖相对完整的研究闭环，让学生在课程中理解科研活动的运作逻辑。学生角色研究员化，就是通过权限下放与机制保障，使学生的身份从操作执行者转变为方案设计者和过程主导者。赋予学生自主设计方案、自主命名样品、全程主导实验进程的权利，同时依托研究生助教现场教学、预实验报告审核、多元过程考核等制度，确保放权与规范并行。

三者递进互促，如图1所示，科研内容教学化提供教学素材，教学过程科研化搭建教学路径，学生角色研究员化激活主体动力，共同指向科研思维的养成。

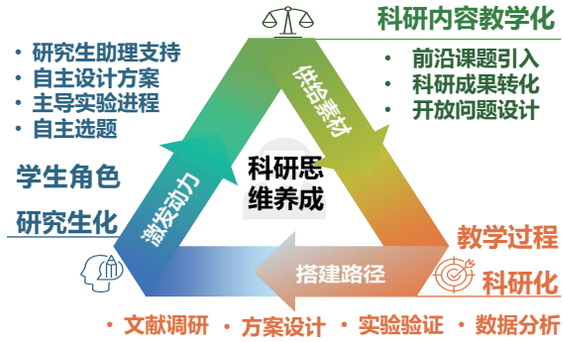


图 1 “三化”关系图

Fig. 1 Relationship diagram of the “three transformations” framework for integrating research content, research-oriented teaching, and researcher-like student roles

2.3 课程整体架构

将上述框架映射到课程组织上，形成课前、课中、课后3个阶段。课前阶段通过线上文献推送与线下产品体验，建立感性认知与问题意识。课中阶段按照“背景建构→方案设计→实验制备→测试分析→总结答辩”的科研逻辑展开。课后阶段鼓励学生进入课题组延续研究，将课程中形成的科研兴趣转化为毕设课题或专利成果。

2.4 课程思政的设计与融合

课程思政没有单独设置说教环节，而是嵌入材料背景和实验讨论中。在介绍柔性显示用CPI薄膜时，教师会结合盖板材料、关键单体、制膜工艺和专利布局等情况，说明这类材料为什么长期受制于美日韩少数企业，为什么国内需要发展自主技术。学生由此能够看到，一个看似具体的薄膜实验，背后实际连接着显示产业链和关键材料自主化问题，从而在了解行业真实格局的过程中，自然建立起专业学习与科技自立自强之间的关联。在实验环节，教师强调如实记录数据、分析失败样品、尊重组内差异结果，并引导组间进行数据对照，让学生体会到科研的严谨来自对事实的尊重，而科研的推进往往依赖多方的协作与碰撞。

3 教学实施

3.1 柔性显示无色透明聚酰亚胺的研究背景

近年来，可折叠甚至可卷曲的柔性显示屏受到人们的青睐，对盖板材料的光学透明度、耐温及机械性能提出更高要求。传统聚酰亚胺(PI)因结构中二酐单元的缺电子性质与二胺单元的富电子性质之间的CTC效应，在可见光区产生吸收，使其呈现黄色(图2)。抑制CTC效应是实现无色透明化的根本途径[11]。针对分子内CTC，可引入含氟基团降低二胺给电子能力，

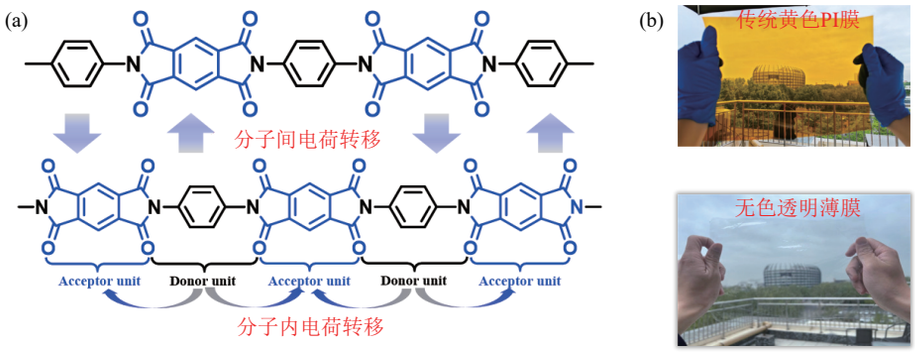


图 2 (a)电荷转移络合效应示意图; (b)传统黄色PI薄膜和CPI薄膜照片

Fig. 2 (a) Schematic illustration of the charge-transfer complexation effect; (b) Photographs of a conventional yellow polyimide film and a colorless transparent polyimide film

或采用脂环族单体阻断共轭通道; 针对分子间CTC, 可引入大体积侧基或构建非平面结构, 增大链间距以削弱电荷转移作用。光学透明性、耐热性与力学性能之间的内在矛盾, 以及化学结构与工艺条件的协同作用, 构成了CPI分子设计的核心科学问题, 也是本课程向学生呈现的开放性研究任务。

本课程提供多种结构单体供学生选择组合, 亚胺化方式可选化学法或程序升温热法, 热处理气氛为氮气或空气。该单体组合与工艺参数空间覆盖多种设计策略, 保证每位学生拥有独立实验方案。课题涵盖分子设计、聚合制备、制膜工艺、多性能表征与构效分析全流程。

3.2 课前阶段

开课前2周, 教师通过微信群推送相关的文献、综述等。布置线下任务: 学生体验折叠屏手机或电脑, 观察屏幕折痕、透光性等特性, 查阅产品公开的显示结构信息。教师收集反馈问题作为课堂素材。

3.3 课中阶段

课中阶段历时2星期, 按以下4个环节展开。

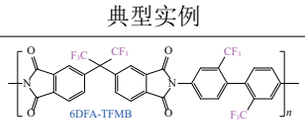
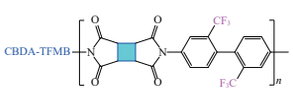
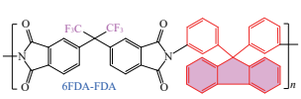
背景建构与安全培训环节, 教师讲授产业背景、CTC显色机理与分子设计策略, 随后进行安全培训、聚合装置与制膜设备操作规程、表征仪器使用要点。

自主方案设计与论证环节, 学生查阅文献, 选择二酐与二胺单体组合, 汇报设计理念, 从电子效应和空间效应论证合理性。学生的设计路径呈现多样化特征, 部分学生的设计路径如表1所示。其中, 有学生提出引入类似DNA双螺旋的刚性骨架以协同提升透明性与耐热性, 并论证了理论可行性, 但因相应单体无市售来源, 经指导教师建议, 调整为不对称酸酐与不对称二胺组合, 利用非平面扭曲结构实现相似设计目标。教师与学生逐一商定方案。每位学生拥有独立配方与工艺参数组合, 自主命名样品。

助教现场教学与样品制备环节, 助教演示聚合、亚胺化、铺膜操作, 边演示边讲解实验原理与操作要领。学生撰写预实验报告, 详细列出操作步骤、试剂用量、预期现象及注意事项, 经助教逐份审核后进入实验室。在老师指导下学生独立完成实验, 获得标识有专属名称的CPI薄膜样品。

表 1 学生自主设计路径与典型实例

Table 1 Students' independent design pathways and representative examples

设计层面	设计策略	典型实例
分子结构	引入强电负性－CF_3，抑制分子内CTC，提升透明性	 6DFA-TFMB
	采用非共轭酯环结构提升透明性	 CBDA-TFMB
	引入刚性大体积侧基，兼顾光学与耐热	 6FDA-FDA
复合策略	高耐热与高透明溶液不同比例共混	CBDA-TFMB与6FDA-TFMB体系混合
工艺变量	不同环化方式 不同气氛	对比化学亚胺化与热亚胺化 对比氮气与空气气氛

测试与数据分析环节，学生独立完成示差扫描量热、热失重分析、动态热机械分析等热学性能表征，紫外–可见光谱和色度等光学表征，以及力学性能表征，每人至少制作一张数据汇总图。随后进行组内预汇报，在教师指导下详细分析数据、优化图形规范性。学生从分子结构与制膜工艺两个维度分析，重点关注透明性、耐热性与力学性能之间的关联与矛盾，撰写实验报告。

3.4 课后阶段

课程结束后，教师通过匿名问卷收集学生对课程内容、教学安排及自主设计环节的反馈，据此优化下一年度课程设计。同时，教师与部分学生继续保持科研对接，鼓励其在课程方案基础上进一步深入。

4 教学效果与评价

课程采用基于OBE理念的多元评价体系，成绩由实验记录本(25%)、实验报告(40%)、PPT汇报答辩(35%)3部分构成，分别对应过程规范性、数据分析与表达能力的考核。最近一期课程总成绩平均分为87.6，优秀率41.7%，无不及格情况。实验记录本得分离散度最大，验证了将过程记录纳入考核的必要性；实验报告与答辩得分较为集中，表明学生在数据分析与口头表达方面训练成效较为一致。答辩中多数学生能够说明自己为什么选择某一单体组合或工艺条件，并能尝试用结构差异解释透明性、耐热性和力学性能的变化；部分学生主动展示了不透明、开裂或性能不达预期的样品，并分析可能原因，初步体现出科研反思意识。答辩后评审委员会书面反馈修改建议，学生逐条修改实验报告，再经学生、指导教师、评审组长三方签字后归档，为教学质量提供制度保障。

课程结束后向全体学生发放匿名问卷，回收率100%。2024年和2025年问卷结果显示，学生对课程学习效果的“非常好/较好”评价比例由2024年的57.14%提高至2025年的85.71%；认为动手操作对基础知识掌握“效果非常好/效果较好”的比例由71.43%提高至100%；对课程目标“非常了解/基本了解”的比例连续两年均为100%。一方面，多位学生提及自主命名样品和经历完整科研流程是课程最深刻的印象。另一方面也集中反映出实验周期较短、报告撰写和PPT汇报压力较大等问题，提示后续课程应针对性加强该方面的指导。

从专业培养目标看，本课程较好支撑了高分子专业学生综合运用理论、实验和工程知识解决复杂材料问题的能力培养；从研究目标看，课程实现了由单一操作训练向“文献调研—方案设计—样品制备—性能表征—构效分析”全流程科研训练的延伸。部分学生选择留组深造，将CPI方向延续为学位论文课题；另有学生在课程方案基础上经教师指导进一步提炼，以本科生为第一发明人申请国家发明专利并已获授权，形成了从课程到毕设再到创新产出的连续链条。

5 结语

以柔性显示用CPI薄膜为载体，将教师科研项目中的结构设计、薄膜制备和性能评价内容转化为大四综合实验课程。课程的关键做法，是不给学生统一配方，而是让学生在一定边界内自行选择结构和工艺，并用测试结果反过来判断设计是否合理。实践表明，这种方式能够把聚合、制膜、表征和数据分析串联起来，使学生对高分子材料研发过程形成更完整的认识。小班化组织、研究生助教深度参与以及完整的聚合与表征平台是模式有效运行的基本支撑。后续将进一步加强实验报告写作和非预期结果分析的指导，并探索将该模式拓展至其他高分子材料方向。

参 考 文 献

1 赵昕. “准研究生制”培养模式下高分子光电材料课程的教学实践与探索. 化工管理, **2023**, (9), 15−18.

2 许佳丽, 朱娟娟, 朱蕾, 郑伟龙, 俞森龙, 史同娜, 刘津, 吴文华. 科教融合视域下聚丙烯共混阻燃改性的综合实验设计. 高分子通报, **2025**, 38(10), 1576−1584.

3 闫红强, 夏衍, 王炳涛, 杨勇, 邓萌, 方征平. 科教融汇赋能新质生产力视域下高分子材料与工程专业应用型人才创新能力培养. 高分子通报, **2026**, 39(5), 831−838.

4 康春燕, 康敏燕, 霍怡廷, 华宇鹏, 吴春灵. 产教融合视域下应用型本科院校高分子材料课程教学改革研究. 内蒙古石油化工, **2026**, 52(1), 73−77.

5 计志娜, 张丽颖, 陈明丽, 杨婷, 王宏光. 科研成果转化为实验教学的探索-聚合物膜的制备及其性能表征. 广东化工, **2022**, 49(20), 230−231.

6 冷雪菲, 王艳色, 王海, 陶胜洋. “产学研”深度融合应用于“聚合物工程综合训练”教学的探索与实践. 大学化学, **2025**, 40(4), 66−71.

7 付蕾, 丁镠, 邓志峰, 赵中国. 并行式实验教学模式提高学习内驱力的探索: 以高分子专业“光敏3D打印项目化实验”为例. 中国教育技术装备, **2025**, (10), 130−133.

8 蒋莉, 陈昌正, 苏洋, 宋浩, 董延茂, 袁妍, 李理. 电化学法合成聚苯胺及其防腐蚀应用: “聚苯胺化学合成”实验的改进与创新设计. 大学化学, **2024**, 39(3), 336−344.

9 徐鹏武, 杨伟军, 王玮, 杜明亮, 白绘宇, 张胜文, 刘天西, 马丕明. 以热点问题为导向的高分子物理综合实验设计: 以“透明耐热聚乳酸膜材料的制备及表征”为例. 高分子通报, **2024**, 37(1), 127−132.

10 Fan, J. K.; Li, Y. J.; Wei, Y. T.; Liu, F.; Lu, D. D.; Ye, T.; Dai, J.; Cheng, X. Application of electrochemical chlorination reaction in organic laboratory course. *J. Chem. Educ.*, **2023**, 100(8), 3008−3016.

11 白帆, 江怡雯, 李琇廷, 董杰, 赵昕, 张清华. 柔性显示盖板用耐弯折无色透明聚酰亚胺薄膜的制备与性能. 高分子学报, **2024**, 55(10), 1393−1404.