高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

教育与教学 / Education DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26339

高分子化学实验智慧课程建设与数字化教学实践

李美星* 沈清明

(南京邮电大学材料科学与工程学院 南京 210003)

摘 要 随着国家教育数字化战略的深入实施，高校实验教学的智能化变革成为提升拔尖创新人才培养质量的关键突破口。本研究以高分子化学实验课程为例，系统阐述了智慧课程建设的整体架构与实施路径。课程以“能力导向、虚实融合、数智赋能”为核心理念，构建知识、能力、问题三大图谱体系，整合多项虚拟仿真实验，打造“实体实验+虚拟仿真”深度融合的教学资源平台。课程教学采用问题导向探究式学习与P-BOPPPS-E结合的教学模式，借助AI智能体等工具辅助个性化学习与过程性评价，实现从经验评价向数据驱动多元评价转型。该模式有效锻炼学生解决复杂工程问题的能力，提升科研思维和实验教学效果，为实验类课程数字化转型提供了可推广的实践经验。

关键词 高分子化学实验；智慧课程；能力图谱；虚拟仿真实验；数字化教学实践

Intelligent Course Construction and Digital Teaching Practice of Polymer Chemistry Experiment

Mei-xing Li*, Qing-ming Shen

(*School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003*)

Abstract With the in-depth implementation of the national education digitization strategy, the intelligent reform of experimental teaching in colleges has become a key breakthrough in improving the quality of training top-notch innovative talents. Taking the polymer chemistry experiment course as an example, this study systematically expounds the overall structure and implementation path of the intelligent course construction. The course takes “ability orientation, virtual and real integration, and digital intelligence empowerment” as the core concept, constructs three map systems of knowledge, ability, and problem, integrates a number of virtual simulation experiments, and creates a teaching resource platform with deep integration of “entity experiment + virtual simulation”. The course teaching adopts the teaching mode of problem-based inquiry learning combined with P-BOPPS-E, and uses tools such as AI agent to assist personalized learning and process evaluation, so as to realize the transformation from experience evaluation to data-driven multiple evaluation. This mode effectively exercises students’ ability to solve complex engineering problems, improves scientific research thinking and experimental teaching effect, and provides practical experience for the digital transformation of experimental courses.

Keywords Polymer chemistry experiment; Intelligent courses; Ability map system; Virtual simulation experiment; Digital teaching practice

引用: 李美星, 沈清明. 高分子化学实验智慧课程建设与数字化教学实践. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26339

2026-07-17 收稿, 2026-08-20 录用

基金项目: 江苏省高校“科教融汇与产教融合协同育人机制”专项课题(项目号 2026DGS047); 南京邮电大学教学改革研究项目(项目号 JG03024JX21)

* 通信联系人: 李美星, E-mail: iammxli@njupt.edu.cn

Citation: Li, M. X.; Shen, Q. M. Intelligent course construction and digital teaching practice of polymer chemistry experiment. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26339

教育数字化转型已进入全面深化的新阶段，实验教学作为培养大学生科学精神、实践能力和创新意识的关键环节，其数字化改革既是落实国家教育战略的必然要求，也是破解传统实验教学资源单一、安全风险高、时空限制严等困境的现实路径。

“高分子化学实验”是高分子材料与工程专业的核心必修课，旨在深化学生对高分子化学基本原理的理解，强化聚合物合成技能，培养运用科学方法解决复杂工程问题的能力。然而，传统实验教学模式存在明显局限[1~3]：一是教学内容相对固化，与学科前沿和产业需求存在脱节；二是高分子合成实验常涉及易燃、易爆或有毒试剂，受制于安全性、时空及成本限制，验证性实验偏多，前沿高阶探究实验开展困难；三是教学管理与评价相对粗放，高度依赖课后实验报告，难以实现对学生操作过程的精细化指导与增值评价；四是实验预习效果不佳，教材单一且缺乏互动，学生主动性不足。面对新材料产业对高层次创新人才的迫切需求，亟需依托数字化转型，全面重构实验教学体系。近年来，依托柔性电子全国重点实验室的科研势能与国家级虚拟仿真实验教学一流课程的建设基础，课程团队以“能力图谱引领、虚拟仿真驱动、人工智能赋能”为主线，系统开展了高分子化学实验智慧课程建设。本文将从课程的整体设计、数智化资源建设、教学实践创新、数据驱动评价等方面，全面总结课程数字化改革的探索与成效，以期为实验类课程的数字化转型提供参考。

1 智慧课程建设理念与架构

课程以“能力导向、虚实融合、数智赋能”为核心理念，构建以学生为中心的智慧实验教学体系，如图1所示。课程以新工科与工程教育认证要求为牵引，充分梳理实验能力要素并对应重构教学内容与评价标准；并通过实体实验与虚拟仿真的深入融合，打破传统实验的时空与资源壁垒，实现微观反应过程的可视化与合成条件的灵活调控，在容错式探究中完成材料结构与性能影响关系的规律探究；同时，课程聚焦于知识—能力—问题的三大图谱、AI智能体、大数据模型等技术与教学全流程的有机融合，实现从经验教学向数据驱动教学的模式转变[4]。

本课程打破传统以知识单元为核心的目标设定模式，构建了涵盖基础验证实验-综合设计实验-创新探究实验递进式能力培养的教学路径。在基础验证实验中，学生掌握各类聚合反应的原理与实验方法，以及高分子合成实验的基本操作与安全规范。在此基础上学习聚合反应动力学研究方法，通过实验实践提升实验方案设计、条件优化与数据分析能力，实现对聚合物结构与性能进行初步评价和综合设计。与此同时，学生运用虚拟仿真工具与智慧课程资源来辅助解决复杂工程问题，在锻炼科研创新思维与创新意识的同时，在实验探究中养成实事求是的科研态度与精益求精的科研追求。

围绕三层级能力目标，课程将基础操作技能融



图 1 智慧课程建设理念

Fig. 1 Conceptual framework of intelligent courses construction

入高分子合成、成型和性能测试中进行实践应用。如表1所示，课程设置了不同类型高分子聚合反应(本体聚合、悬浮聚合、界面缩聚)、高分子材料成型(聚氨酯泡沫塑料制备)、导电高分子材料合成与性能测试(聚苯胺的制备和电阻率测试)、功能高分子材料制备与测试(光致变色材料与水凝胶材料的制备及性能测试)、光电功能高分子材料设计优化(半导体发光聚合物设计制备及应用虚拟仿真实验)等。最终形成了“基础验证实验→条件优化实验→材料性能测试→综合设计实验”的递进式能力进阶路径。

课程充分挖掘高分子化学实验中的思政元素，从材料发现历史、科学研究方法、产业应用实例、健康及具身智能[5]领域、国家重大需求及中国制造成就等维度系统设计思政融入点，实现课程思政育人[6]。在验证性实验中，结合高分子材料在建筑、医学、交通、航空航天等领域的应用实例，引导学生认识高分子材料的重要价值及国家战略材料需求；在聚苯胺制备实验中，融入诺贝尔奖得主白川英树发现导电聚合物的故事，培养学生追求卓越的科学态度[7]。半导体发光聚合物虚拟仿真实验则将思政教育提升至国家战略层面。该实验紧贴新一代显示技术对新型发光材料的重大需求，基于诺贝尔奖Suzuki偶联反应机理[8]，将国家自然科学二等奖、国家级重大项目的半导体发光聚合物前沿成果转化为教学资源，引导学生聚焦信息显示行业“卡脖子”材料研发，在培养创新思维的同时，增强对柔性电子“中国制造”成就的认同感与民族自信心。同时，课程建设了数字化资源与平台，为思政融入提供了丰富载体，通过视频推送、在线讨论、AI场景引导等方式，使思政教育从单向说教转向沉浸式体验与主动建构。

表 1 高分子化学实验课程内容

Table 1 Content of polymer chemistry experiment course

项目名称	能力层级	思政内涵与素材
单体精制与减压蒸馏	基础操作	严谨细致科学态度；安全意识与绿色发展理念(杂质存在对聚合反应过程和产物的影响讨论)
有机玻璃板制备与透光率测定	基础操作+性能探究	性质与应用的相互关系；学有所用，以国家社会需求为己任(高分子材料在建筑、医学、照明、航空航天等方面的应用)
界面缩聚制备对苯二甲酰己二胺	基础操作	严谨的科学态度，激发学生科技报国热情(卡罗瑟斯发明尼龙的故事，我国在尼龙产业中的短板)
反相悬浮聚合制备珠状强吸水树脂及水容量测定	基础操作+性能探究	量变到质变的规律，客观规律的普适性；严谨细致科学作风(颗粒大小受分散剂用量、搅拌速度的影响关系讨论)
软/硬质聚氨酯泡沫塑料制备及测试	基础操作+性能探究	科技创新；爱国、拼搏奋进的奥运精神(北京冬奥会速滑竞赛服聚氨酯材料应用)
聚苯胺导电薄膜制备和导电率测定	综合应用+创新探究	实验细节、严谨求实、追求卓越的科学态度(诺贝尔奖得主白川英树发现导电聚合物的故事)
功能高分子材料的制备及性能研究(光致变色材料、水凝胶材料、可穿戴柔性传感材料)	综合应用+创新探究	高分子材料在生产、生活及生命健康领域中的重要价值(智能窗户、防伪标签、自愈合敷料、肿瘤诊疗与药物递送、高性能膜材料、柔性可穿戴传感及具身智能等领域应用)
半导体发光聚合物设计制备与应用虚拟仿真实验	综合应用+创新探究	对柔性电子中国制造、家国情怀；勇于探索、自主创新(诺贝尔奖Suzuki偶联反应；柔性显示光电材料研发进展)

2 数智化教学资源与平台建设

2.1 能力图谱引领的资源体系重构

课程围绕知识、问题、能力3个维度，系统构建了三维图谱体系(图2)。其中知识图谱涵盖了861个知识点，覆盖高分子化学实验的理论基础、操作技能与分析方法。问题图谱中27个核心问题节点分别对应实验方案设计、工艺参数优化、产物性能调控等关键环节，并设置了3个一级问题、6个二级问题和18个三级问题。能力图谱分解32个能力点，从基础操作技能(如加热、回流、蒸馏、无水无氧操作等)到综合设计能力(如聚合方法选择、条件变量控制、响应面优化)再到创新探究能力(如材料结构设计、器件性能预测)，形成可视化能力进阶地图，为教学内容组织与个性化学习路径提供结构化支撑。

2.2 虚拟仿真实验资源的系统整合

为了让学生更好地获得对实体实验中微观原理的直观认知，并实现自主练习与自由探索，课程基于iLab实验空间国家虚拟仿真实验教学共享平台，筛选并整合了9项虚拟仿真实验项目作为数字化教学资源，如图3所示，涵盖高分子构象与尺寸模拟、悬浮聚合动态分析、聚氨酯绿色发泡工艺、聚苯胺电化学制备与结构表征、光/电功能高分子材料设计与性能优

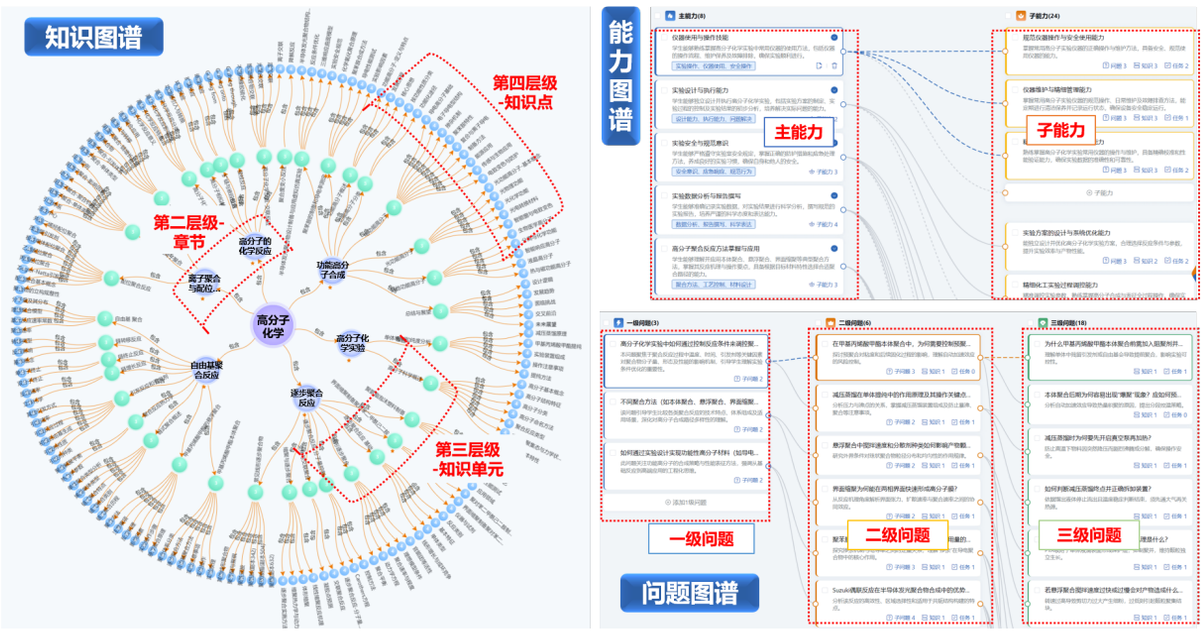


图 2 高分子化学实验课程图谱体系

Fig. 2 The map systems of polymer chemistry experiment course

化等核心内容。其中课程团队自建的国家级一流课程“半导体发光聚合物设计制备与应用虚拟仿真实验”，深度模拟了聚合物合成实验环境、合成条件优化全过程、以及发光器件精密组装与测试场景。该虚拟仿真实验将诺贝尔奖Suzuki偶联反应机理、国家自然科学二等奖前沿成果转化为可交互的探究式学习项目，实现了微观反应动态的可视化展示与合成工艺的迭代优化训练。在实现科研反哺教学的同时，为本科生提供高阶的教学与训练资源。

2.3 AI赋能智慧学习平台

课程构建了集AI智能体、场景模拟、任务管理、学情分析等于一体的智慧学习平台，如图4所示。平台为不同的学习任务配备专属AI智能体，借助构建的课程专属知识库来确保AI回答精准贴合高分子化学专业内容，避免回答结果泛化。

此外，在该平台中设置了对实验重要环节、注意事项、安全规范等内容的针对性探讨与考核，此环节学生在实验前可系统地巩固理论知识，为实验操作做好准备进而提升实验成功率。平台实现实验手册线上化，支持学生在线填写、导出及AI辅助批阅，在规范实验记录的同时提升教师批阅效率，推动实验教学管理从纸质化到数字化的系统转型。学生的学习数据与讨论交互过程会被记录下，并通过AI驱动的学情分析与教学优化。系统可生成学情分析报告，



图 3 课程选用的虚拟仿真实验项目

Fig. 3 Virtual simulation experiments selected for the course

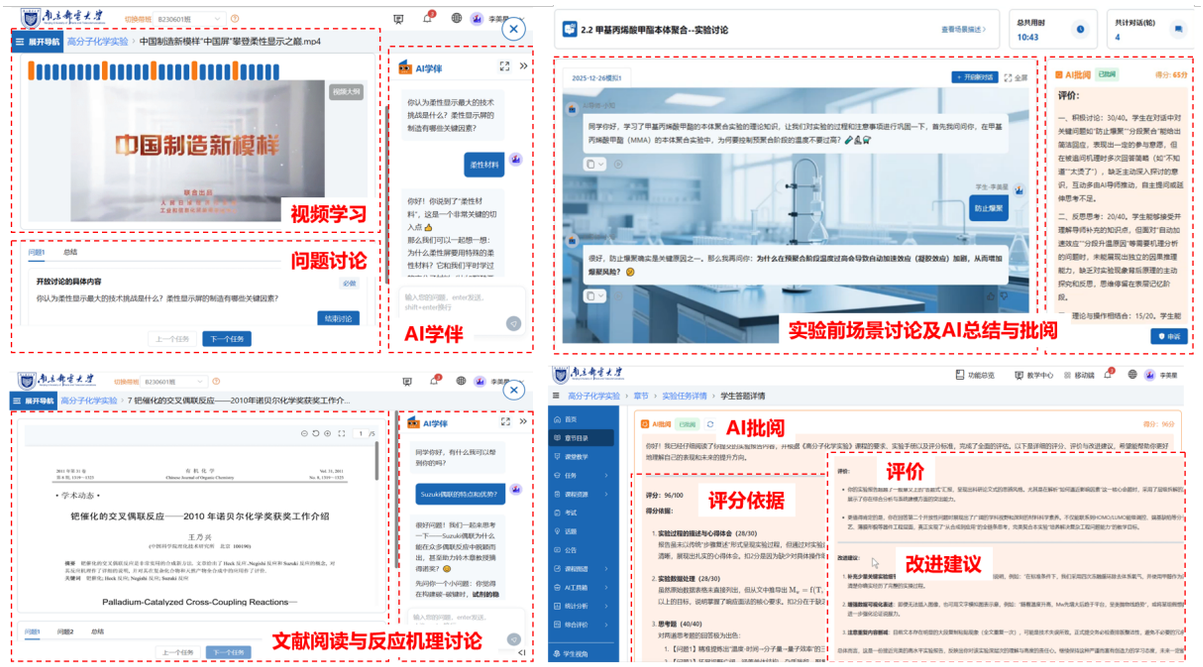


图 4 AI赋能智慧学习平台

Fig. 4 AI-empowered smart learning platform

输出学生知识点掌握度、问题解决能力等多维度评价数据，并推送个性化发展建议，同时可帮助教师精准把握教学难点，实现教学策略的动态调整。

3 虚实融合的教学实践应用

3.1 混合式教学模式设计

课程采用P-BOPPPS-E教学模式，是在经典的BOPPPS模型基础上的创新拓展(图5)。其中，前缀P (preview)代表课前先导，强调借助AI智能体完成个性化预习与问题生成；后缀E (extension)代表课后延伸，提供高阶的材料设计开放挑战和拓展研讨环节。与经典的BOPPPS相比，本模式中将AI学伴嵌入教学全链条，并将评价维度从课堂内延伸至课前准备和课后拓展，形成完整的学习数据。此外，以问题驱动式探究学习(PBL)贯穿始终，使每个环节围绕复杂工程问题的解决而展开。在数智应用方面，课前(AI预讨论与虚仿预习)，学生在平台上进行课件学习、观看实验操作视频、完成虚拟仿真预习任务，AI根据预习情况生成个性化问题，引导深度思考实验关键环节。课中(虚实结合的探究式学习)，实验环节，教师巡场指导，学生分组操作，实验现象通过移动端上传平台，以任务闯关模式完成实验流程及结果记录；而在虚仿实验环节，学生在虚拟环境中大胆试错并进行方案设计、参数优化、结果预测，平台实时记录操作数据并对互动步骤进行赋分。课后(数据复盘与精准干预)，AI辅助记录与批阅实验报告，生成个人与班级学情报告，推送薄弱知识点与改进建议；教师根据平台教学数据调整教学策略，并实现个性化指导与精准教学干预。

3.2 虚拟仿真实验环节

以半导体发光聚合物设计制备与应用虚拟仿真实验为例，如图6所示，学生依次完成“材料制备—性能探究—工艺优化—器件应用”四大模块的实验内容。模块一是实验认知环节，该模块旨在实现实验安全与原理知识的问题前置，使学生在进入实验前建立系统的风险意识与理论储备。学生通过交互式体验了解实验安全规范及实验原理，完成对应测试，强化实验安全知识，掌握合成原理，理解分子结构与发光性能的内在联系，包含实验室虚拟漫游、仪器操作测试、无水无氧合成流程等基础性实验训练。模块二材料制备则聚焦于操作—表征—规律发现的闭环训练，学生以任务驱动式探究过程进行聚合物制备及性能测试，掌握基本仪器表征技术和方法，明确材料结构与性能间相辅相成的关系，达到合成工艺的精益求精。模块三设计优化环节鼓励学生自主探究与独立设计，聚焦于探索不同反应条件对产物分子量、发光性能的影响规律，运用响应面法函数分析技术对合成工艺参数进行精细化优化。该模块是虚实融合教学区别于传统实验教学的核心所在，允许学生通过虚拟环境中的迭代试错，完整经历科研优化流程。学生通过实施单因素与多因素优化实验，构建并解析实验数据模型与曲线图，采用响应面分析法筛

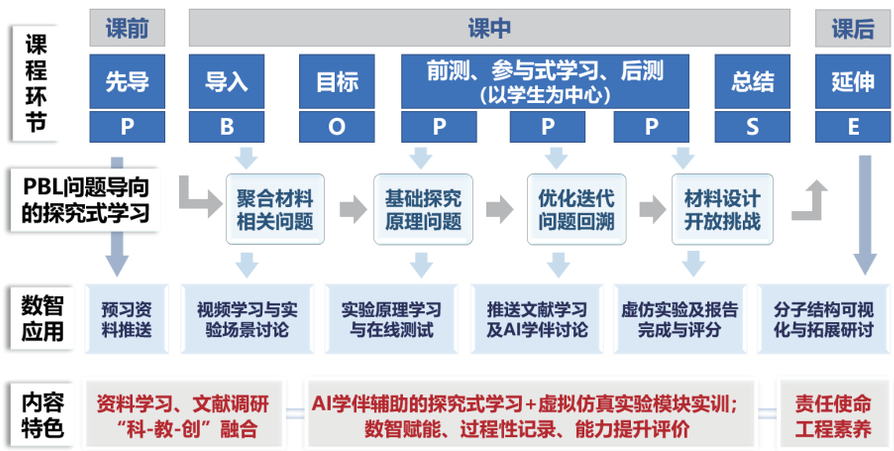


图 5 基于P-BOPPPS-E和PBL驱动的教学过程

Fig. 5 P-BOPPPS-E-based and PBL driven teaching process



图 6 虚拟仿真实验环节

Fig. 6 Virtual simulation experiment session

选出高发光效率半导体聚合物合成的最优条件。模块四器件应用环节强化结构设计—材料合成—器件验证的完整科研链条训练，学生在前期探究规律的基础上自主制定综合方案，在最佳合成参数条件下制备半导体发光聚合物材料，实现从按方抓药到自主开方的能力跃升；之后将所得产物作为发光层材料集成于发光器件中，通过器件的组装与发光性能测试验证材料发光效能。此模块不仅加深了学生对半导体发光聚合物在发光器件及信息显示领域应用的理解，还强化了将理论知识应用于实践的能力。

4 数据驱动的多维评价体系

课程打破传统以实验报告为主的单一评价模式，构建了“定性评价与定量评价相结合、过程性评价与结果性评价相结合”的多元化评价体系，如图7所示。其中定性评价包括学生对实验方案设计的互相评价、对实验数据分析的合理性评价、以及在实验准备和完成过程中的任务分工执行情况；此外，学生实验态度、AI讨论任务的完成结果，以及课程学习的综合评价和建议也作为定性评价的参考。课程的定量评价数据主要来源于过程性评价和结果性评价，过程性数据包括实验内容预习、课程资源学习、实验方案设计、实验操作过程、产物产率及性能、实验报告质量等，占比45%；结果性数据涵盖课程理论考核及实验考核的成绩，通过虚拟仿真系统完成，占比55%。

在虚拟仿真实验考核中，实施“能力基准+成长

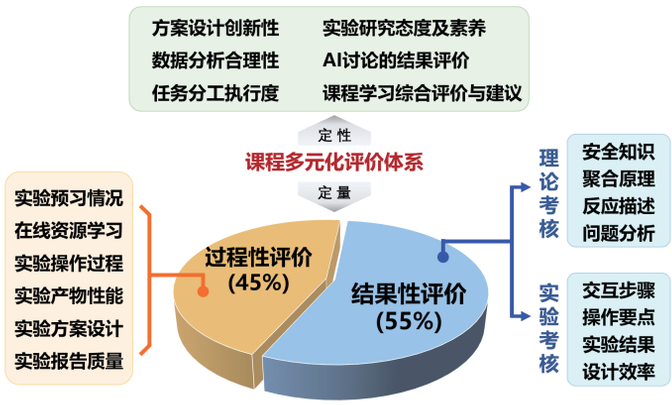


图 7 课程多元评价体系

Fig. 7 Multidimensional evaluation system of the course

潜力”的复合评价机制。以半导体发光聚合物虚仿实验的设计优化模块为例，学生探究反应条件对聚合物分子量与发光效率的影响规律并构建函数关系模型，系统通过对比学生首次构建函数模型与标准结果的吻合度评定基础得分，同时根据其后续优化迭代的次数与器件效率提升幅度给出能力提升分，实现一人一解的个性化评价。平台自动采集全过程交互数据，将学生表现映射至能力图谱，生成可视化能力雷达图，直观呈现“基础操作—综合设计—创新探究”三级能力达成情况，为个性化学习路径推荐提供数据支撑。

智慧教学平台对学生学习行为的全流程数据进行采集与分析，从课前视频观看时长、AI对话轮次与深度，到课中实验操作步骤记录、虚拟仿真交互轨迹，再到课后报告质量与自测成绩，形成了完整的学习数据链条。AI基于这些数据自动生成学情分析报告，呈现知识点个人与班级平均掌握度的横向对比，同时提供纵向的能力发展诊断与个性化建议。例如，系统识别到某学生知识点掌握度低于班级平均时，会针对性地建议其回归重点章节、利用知识图谱工具构建概念关联、对错题进行归因分析等，实现了从统一教学到个性引导的转变。

经过教学实践，课程数字化改革取得了显著成效。在实验教学效果方面，通过在线预习与AI场景预讨论，学生对实验内容和基本流程做到心中有数，课堂实验操作失误率明显下降，实验成功率显著提高。学生课堂参与热情提升，与教师的互动讨论更加深入，实验报告的深度与反思质量明显改善。在学生高阶能力培养方面，虚拟仿真实验使学生不再局限于执行基础验证性操作，而是通过试错机制与优化迭代策略深入探究，从中提炼解决复杂工程问题的方法[9]。数据显示，95%以上学生能够独立完成虚拟仿真实验，80%以上学生能够构建并优化三维函数模型，60%以上学生能够提出初步的拓展设计方案。学生在课程前后对“利用专业知识设计满足特定指标要求的高分子材料与器件”这一高阶目标的自我评价达成度显著提升。

5 结语

高分子化学实验智慧课程建设以能力图谱为引领，以虚拟仿真实验为有效补充，以人工智能技术和数字资源平台为支撑，初步实现了实验教学从经验驱动向数据驱动、从统一施教向个性导学、从基础验证向创新探究的系统转型。课程所形成的“能力图谱构建—数智资源开发—混合模式创新—智能评价改革”的课程建设路径，为实验类课程的数字化转型提供了可借鉴的实践经验。

然而课程建设仍存在需要持续深化和改进的地方，一是提升AI助手的多模态能力，例如手写实验数据、装置草图、实验现象图像等多模态信息的识别能力有待提升，需要实现更全面的智能反馈；二是引入AI视觉等数智化实时识别、评价技术，在线下实验环节实现对实验操作过程的智能监测与评价，真正构建面向实验实践类课程的AI赋能型智慧教学平台；三是进一步完善产教融合机制，将健康医疗、新能源等国家战略需求领域的高分子前沿成果与产业标准动态融入能力图谱更新机制，培养真正适应新材料产业需求的高层次创新人才。

参 考 文 献

1 曾安蓉, 汪扬涛, 曾安然, 李云龙. 基于项目化的“理论-实操-虚拟仿真”一体化课程改革实践: 以《高分子化学》课程教学为例. 高分子通报, **2024**, 37(3), 413−418.

2 于惠梅, 张宇浩, 李子恒, 王思文, 徐奕, 滕鑫. 基于虚实融合的任务驱动式高分子化学实验教学研究. 实验室研究与探索, **2026**, 45(1), 122−126.

3 谢丹, 陈风青, 姜柏羽, 肖友华, 刘丽娜, 戴进峰. 基于知识图谱与AI赋能高分子化学的数智化教学思考. 高分子通报, **2025**, 38(5), 837−843.

4 张夏兰, 吕秋丰, 靳艳巧, 林起浪. 虚实结合的高分子化学实验课程教学改革探索. 化工高等教育, **2024**, 41(4), 142−149.

5 闫红强, 谢东梅, 夏衍, 邓萌, 方征平. 具身智能高分子材料. 高分子通报, **2026**, 39(3), 415−437.

6 罗春燕, 陈卫星, 杨晶晶, 金洗郎, 牛小玲. 串并协同实现高分子物理课程思政育人及三阶能力培养. 高分子通报, **2025**, 38(10), 1585−1590.

7 诸平, 张文根. 白川英树与导电聚合物的发现. 大学化学, **2003**, 18(1), 60−62.

8 宋舒悦, 王晓东, 张安东, 刘岳衡, 谷承霖, 刘亚辉, 薄志山. 反应条件对Suzuki聚合制备聚芴分子量的影响. 高分子学报, **2025**, 56(2), 299−305.

9 孙鹏飞, 沈清明, 王义成, 李美星, 钱妍. 半导体发光聚合物设计与制备实验虚拟仿真系统开发及应用. 实验室研究与探索, **2024**, 43(6), 84−87.