

# 绿色低碳导向的高分子化学实验微量化改造与实践

刘巧宾, 王晓蓓, 李冬至

北华航天工业学院 材料工程学院, 河北 廊坊 065000

DOI:10.61369/EIR.2026050037

**摘要：**在国家“双碳”战略推进与教育数字化转型背景下，高校高分子化学实验教学面临试剂消耗量大、危险废弃物多、能耗偏高、安全风险集中等现实问题。本文以绿色低碳为导向，将 EHS（环境、健康、安全）理念贯穿实验教学全流程，围绕高分子化学核心实验开展微量化、低毒替代、工艺优化、数智辅助系统性改造。通过微型化装置应用、反应参数优化、AI 辅助方案设计、虚实融合安全警示等措施，实现试剂用量、能耗、危废下降，同时保证教学等效、安全可控。实践表明，微量化改造是推动高分子化学实验教学绿色低碳转型、落实本质安全、培育学生 EHS 素养的有效路径，可为省内同类高校实验教学改革提供可复制、可推广的实践范式。

**关键词：**绿色低碳；高分子化学实验；微量化改造

## Microscale Transformation and Practice of Polymer Chemistry Experiments Guided by Green and Low-Carbon Principles

Liu Qiaobin, Wang Xiaobei, Li Dongzhi

School of Materials Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang, Hebei 065000

**Abstract：** Against the backdrop of the national "dual carbon" strategy and the digital transformation of education, experimental teaching of polymer chemistry in universities faces practical challenges such as high reagent consumption, a large amount of hazardous waste, high energy consumption, and concentrated safety risks. Guided by the principles of green and low-carbon development, this paper integrates the EHS (Environment, Health, and Safety) concept throughout the entire experimental teaching process. It carries out systematic transformations centered around microscale operations, low-toxicity substitutions, process optimization, and digital intelligence assistance for core polymer chemistry experiments. Through measures such as the application of microscale devices, optimization of reaction parameters, AI-assisted experimental design, and the integration of virtual and real-world safety warnings, we achieve reductions in reagent usage, energy consumption, and hazardous waste while ensuring equivalent teaching outcomes and controllable safety. Practice has demonstrated that microscale transformation is an effective pathway to promote the green and low-carbon transition of experimental teaching in polymer chemistry, implement intrinsic safety, and cultivate students' EHS literacy. It provides a replicable and scalable practical model for experimental teaching reform in similar universities within the province.

**Keywords：** green and low-carbon; polymer chemistry experiments; microscale transformation

### 引言

高分子化学实验是材料类专业人才培养的核心实践环节，主要包括自由基聚合、乳液聚合、溶液聚合、悬浮聚合以及聚合物基本表征等内容。这类实验普遍使用有机溶剂、引发剂与助剂，反应过程多伴随放热明显、温度敏感、挥发性气体产生等特点，长期存在试剂用量大、危废种类多、安全风险点密集、设备能耗偏高等共性问题。相关数据显示，高校实验室整体能耗约占校园总能耗的 30% 以上<sup>[1]</sup>，其中高分子化学实验室因通风系统、加热装置、恒温设备长期运行，能耗与资源消耗更为突出。

传统实验模式以常量体系为主，操作流程相对粗放，不仅造成试剂与能源浪费，还会增加废液、废渣处理压力，与当前绿色校园建设、低碳教育要求以及“双碳”目标下的人才培养方向存在差距。EHS 管理理念强调源头防控、过程管控、风险最小化<sup>[2]</sup>，与绿色实验、本质安全的改革方向高度契合。微量化实验通过缩小反应体系、优化装置与工艺，能够从源头降低消耗、削减风险、提升效率，是实现实验教学绿色化、安全化、精细化的重要路径。

微量化改造在不改变实验原理、不削弱操作训练强度的前提下，能够让学生在有限课时内完成更多组平行实验与对比实验，提升课堂效率与数据可信度。同时，精细化操作有助于培养学生严谨的实验习惯，强化减量意识、环保意识与安全意识，实现知识传授、能力训练与素养培育的统一。

基金项目：北华航天工业学院教研项目（课题编号 JY-2024-087）。

## 一、总体思路与实施路径

### （一）总体思路

本次改造以绿色低碳、本质安全、教学等效、EHS 融入为基本原则，选取高分子化学课程中代表性实验，构建“微量化设计—低毒替代—工艺优化—数智辅助—安全管控—效果评价”的完整实施路径，高校实验室亟需构建系统化、标准化的安全管理体系<sup>[3-4]</sup>，最终实现试剂消耗、能源消耗、危险废物“三下降”，安全水平、教学效率、综合素养“三提升”。

### （二）改造原则

高分子化学实验微量化改造应遵循教学等效原则，即保持实验原理、核心操作、训练目标与数据要求基本不变，确保教学质量不降低；通过减量、降险、简化流程，从源头降低安全风险；推行试剂微量化、溶剂低毒化、能耗精细化、危废减量，践行绿色低碳原则；同时将环境、健康、安全要求嵌入预习、操作、考核、复盘全过程，形成全流程、可量化、可追溯的管理机制。

### （三）实施路径

整体采用闭环推进模式：首先梳理现有实验风险点与能耗痛点；随后从微量化装置、低毒替代、工艺优化、AI 辅助、虚实警示、过程管控六个方面实施改造；再开展教学试点与数据监测；最后进行效果评价并持续优化。

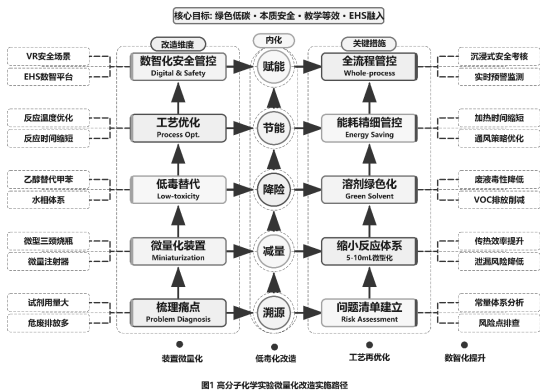


图1 高分子化学实验微量化改造实施路径

## 二、微量化改造关键措施

《高分子化学》实验通常有自由基聚合、乳液聚合、溶液聚合、悬浮聚合等。经梳理，传统实验存在以下突出问题：单次试剂用量多在 10 - 50 g，废液量 100 - 500 mL；有机溶剂挥发、放热失控、高温烫伤、废弃物处置不规范等风险突出；加热、搅拌、通风设备运行时间长，能耗偏高，本文选取 MMA 的本体为典型案例，同时形成乳液聚合、悬浮聚合微量化通用方案，系统阐述实验微量化改造的具体操作。

### （一）微量化装置与工艺优化

近两轮的高分子化学本体具体实验中以微型三颈烧瓶、微量注射器、微型冷凝管、微型搅拌器及微流控模块替代传统常量装置，将反应体系从 50mL 缩小至 5 - 10 mL。微型装置传热更快、反应更平

稳、泄漏风险更低，适合高分子聚合反应的安全控制，配以小型多种模具成型，提高学生重复实验的兴趣，起到提升内驱力的效果。

与常规常量实验相比，改造后单体、引发剂、溶剂按原配比缩减至 1/5 - 1/10，确保反应基本规律与教学要求不变；选用乙醇、乙酸乙酯等低毒试剂替代苯、甲苯等高毒有机溶剂，部分有机反应体系转换为水相体系；适度提升单体浓度、降低溶剂配比，进一步减少实验废液产生量。

将反应温度降低 5 - 10℃，合理延长反应时间，减少副反应发生并降低加热设备能耗；依托微型体系优势，缩短升温、搅拌与冷却的操作时长；优化通风橱运行策略，降低能耗，实现低碳节能。EHS 理念与节能技术融合可提升实验室可持续运行水平<sup>[6]</sup>。

### （二）数智化辅助与安全管控

搭建 VR 虚拟安全场景库与 AI 辅助考核模块，覆盖有机溶剂泄漏、反应放热失控、高温烫伤、废液污染等典型实验风险情境。学生进入实验室实操前，需完成沉浸式安全学习与考核，考核合格后方可开展实验操作，强化风险防范意识。

在试点实验室部署 VOC 传感器、温湿度传感器、用电监测模块，实时采集环境参数与设备运行数据，通过 EHS 数智治理平台实现数据可视化展示、异常情况预警与能耗精准统计，数据赋能与信息化手段可显著提升实验室安全管控效能<sup>[6-7]</sup>。

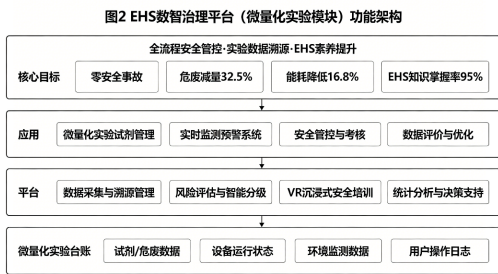


图2 EHS 数智治理平台（微量化实验模块）功能架构

### （三）EHS 全流程融入

预习阶段引导学生开展风险识别与防护方案设计；实操阶段严格落实防护用品佩戴、精准规范操作、废弃物分类收集等要求；考核阶段将 EHS 执行情况纳入课程成绩，占比不低于 30%，违规操作实行一票否决；复盘阶段总结安全管控与绿色改进要点，形成持续提升的长效机制。制度化、专业化、信息化“三化”管理可提升实验室安全治理水平<sup>[8]</sup>。

## 三、实践应用与成效分析

### （一）实践概况

本项目在北华航天工业学院材料工程学院高分子化学实验室开展试点应用，覆盖功能材料、复合材料 2 个专业、4 个班级，共计 120 名学生，完成 MMA 本体聚合、醋酸乙烯酯乳液聚合、苯乙烯悬浮聚合 3 项核心实验的微量化改造，连续运行 2 个学期，实验数据完整、系统运行稳定。

### （二）量化成效

试点后实验试剂用量平均下降 33.2%，部分实验降幅达

45%；危险废弃物产生量减少 32.5%；试点实验室年度能耗降低 16.8%，通风与加热设备运行时间缩短 25% 以上，低碳节能效果显著。试点期间实现零安全事故、零重大隐患，放热、灼伤、中毒等风险显著降低；多组平行实验表明，微量化体系数据重复性更稳定，学生操作规范性与自主探究能力提升，实验开出率保持 100%；学生 EHS 知识掌握率超过 95%，规范操作合格率达 98%。

（三）实践难点与解决措施

改造中遇到微型装置密封性不足、学生微量操作误差偏大、部分师生对数据可靠性存疑等问题。通过更换硅胶密封圈、开展课前专项训练、进行多轮平行对比实验与数据验证等方式逐一解决，保证改造顺利落地。

四、结论与展望

微量化改造能够显著降低试剂消耗、危废产量与实验室能

耗，符合绿色低碳与“双碳”育人要求；微型化装置、低毒替代、工艺优化与数智化监控相结合，可在保证教学等效的前提下提升本质安全水平；EHS理念融入实验全过程并实施过程性评价，有利于强化学生安全素养与环保意识。本次改造形成的方案、流程与指标体系具备可复制性，可为同类高校高分子化学实验改革提供参考。

未来将进一步优化 EHS 数智治理平台，完善能耗精细管控与应急调度功能；扩大实验覆盖范围，形成更完整的微量化课程包；推动 EHS 教育与产教融合对接，贴近行业 EHS 标准培养高素质应用型人才，持续提升实验教学质量与安全治理水平。

参考文献

[1] 古海云. 基于 EHS 理念的应用型本科高校实验室安全信息化建设研究与实践 [J]. 中国管理信息化, 2026, 29 (7): 209-211.  
[2] 陈晓景, 王亚茹, 康永胜, 等. 基于 EHS 理念的化学实验室“四位一体”协同管理模式探究 [J]. 化工安全与环境, 2026, 39 (4): 116-118.  
[3] 陶亚辉, 冯玉如. 高校实验室安全管理体系构建与实践研究 [J]. 化工管理, 2026 (6): 70-73+81.  
[4] 康德飞, 洪钟茂, 韦刘洋, 等. EHS 理念下高校实验室建设与节能实践 [J]. 实验室研究与探索, 2026, 45 (2): 213-217+223.  
[5] 周亚倩, 赵春欣, 张丹, 等. “教育-准入-监管”三位一体实验室安全管理模式 [J]. 大学化学, 2025, 40 (11): 346-353.  
[6] 王洋洋, 李悦天, 钟灿涛, 等. 数据赋能高校实验室安全管理的策略与实践 [J]. 实验室研究与探索, 2026, 45 (1): 246-251+268.  
[7] 郑联. 高校实验室安全管理标准化体系构建及评估 [J]. 大众标准化, 2025 (24): 10-12.  
[8] 陈梦, 何亚静, 林程涛, 等. “三化”管理模式在高校实验室安全管理体系探索与应用 [J]. 化工管理, 2026 (12): 89-92.