

从科研到课堂：含氟低介电树脂微球制备的实验教学改革与实践

罗洪盛^{1*}, 黄桢涵¹, 宋小明¹, 黄露莎²

¹广东工业大学轻工化工学院, 广东 广州

²广州美术学院视觉艺术设计学院, 广东 广州

收稿日期: 2026年8月5日; 录用日期: 2026年9月21日; 发布日期: 2026年9月29日

摘 要

针对传统高分子化学实验教学中阳离子聚合反应类型长期缺失、分子构效关系训练薄弱、实验训练缺乏设计-合成-表征-评价的全链条科研思维等突出问题, 本教改项目将含氟低介电树脂微球的制备研究成果转化为本科综合性创新实验。实验涵盖了无水无氧悬浮聚合工艺、含氟单体比例调控、产物纯化以及傅里叶变换红外光谱、差示扫描量热法、高频介电性能表征等完整科研流程。通过对比不同配方条件下产物的结构与性能数据, 引导学生深入理解含氟基团降低介电常数的作用机制, 系统建立分子结构与宏观性能之间的构效关系认知。教学实践表明, 该实验有效激发了学生的科研兴趣, 显著提升了学生在无水无氧操作、谱图解析及构效关系分析等方面的综合能力, 实验报告质量与课堂参与度均较传统验证性实验有明显改善。本实验实现了科研成果向优质教学资源的高效转化, 为高分子材料与工程、应用化学等专业开展科教融合实验教学提供了可推广的范例。

关键词

阳离子聚合, 低介电材料, 含氟聚合物微球, 悬浮聚合, 实验教学改革

From Research to Classroom: Reform and Practice of Experimental Teaching in the Preparation of Fluorinated Low-Dielectric Resin Microspheres

Hongsheng Luo^{1*}, Zhenhan Huang¹, Xiaoming Song¹, Lusha Huang²

¹School of Chemical Engineering and Light Industry, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

²School of Visual Arts and Design, Guangzhou Academy of Fine Arts, Guangzhou Guangdong

*通讯作者。

文章引用: 罗洪盛, 黄桢涵, 宋小明, 黄露莎. 从科研到课堂: 含氟低介电树脂微球制备的实验教学改革与实践[J]. 创新教育研究, 2026, 14(9): 826-836. DOI: 10.12677/ces.2026.149749

Received: August 5, 2026; accepted: September 21, 2026; published: September 29, 2026

Abstract

In view of the long-term lack of cationic polymerization reaction types in traditional polymer chemistry experiment teaching, the weak training of molecular structure-activity relationship, and the lack of full-chain scientific research thinking of design-synthesis-characterization-evaluation in experimental training, this teaching reform project transforms the research results of the preparation of fluorine-containing low-dielectric resin microspheres into undergraduate comprehensive innovation experiments. The experiment covers the complete scientific research process of anhydrous and anaerobic suspension polymerization process, fluorine-containing monomer ratio regulation, product purification, Fourier transform infrared spectroscopy, differential scanning calorimetry, and characterization of high-frequency dielectric properties. By comparing the structure and performance data of the products under different formulation conditions, students are guided to deeply understand the mechanism of the fluorine-containing groups to reduce the dielectric constant, and systematically establish the structure-activity relationship between molecular structure and macroscopic properties. The teaching practice shows that the experiment effectively stimulates students' interest in scientific research, and significantly improves students' comprehensive ability in anhydrous and anaerobic operation, spectrum analysis and structure-activity relationship analysis. The quality of experimental reports and classroom participation are significantly improved compared with traditional confirmatory experiments. This experiment realizes the efficient transformation of scientific research achievements into high-quality teaching resources, and provides a popularized example for the integration of science and education in polymer materials and engineering, applied chemistry and other majors.

Keywords

Cationic Polymerization, Low Dielectric Materials, Fluorinated Polymer Microspheres, Suspension Polymerization, Reform of Experimental Teaching

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在新工科建设背景下,应用化学与高分子材料专业的实验教学正面临从验证性实验向探究性创新实验的转型,问题导向学习(PBL)与建构主义学习理论为这一转型提供了重要的教学理念支撑[1]。PBL 强调以真实问题为驱动,促使学生在自主探究与团队协作中建构知识体系;建构主义则认为学习是学习者通过环境的互动主动完成知识建构的过程,注重实践与反思的有机统一。将上述理论引入实验教学改革,有助于突破传统实验教学的固有模式,激发学生的研究兴趣与创新意识。当前,传统高分子化学实验教学仍以经典自由基聚合反应为主,实验内容与科研前沿及产业实际存在明显脱节。学生在有限的实验学时中难以接触阳离子聚合这一重要但操作条件较为苛刻的反应类型,对分子结构与宏观性能之间的构效关系缺乏系统性认知[2]。此外,多数实验以单一合成或简单表征为终点,缺少从材料设计、合成工艺优化到性能评价的全链条训练,制约了学生综合实践能力与数据分析能力的提升。

为此,本教改项目将含氟阳离子聚合物微球的制备与表征这一科研前沿成果,重构为适合本科生开展的综合性创新实验。该实验在教学中引入了阳离子悬浮聚合这一经典但本科阶段较少开设的反应类型,

并围绕 5G 高频通信对低介电材料的实际应用需求,设计了含氟单体比例调控、聚合工艺优化、产物纯化以及红外光谱、差示扫描量热、高频介电性能测试等完整教学环节。通过本实验,学生能够掌握无水无氧操作、悬浮聚合工艺等关键技术,在对不同配方条件下实验数据进行比较分析的过程中,深入理解分子结构决定材料性能的核心科学原理,同时获得谱图解析与数据归纳的系统训练。本实验教学改革以 PBL 与建构主义理论为指导,旨在提升学生的综合实验技能、数据分析能力与科学探究素养,推动科研成果向优质教学资源的深度转化[3]-[5]。

2. 教学目标

本实验旨在通过含氟阳离子聚合物微球的制备与表征,提升学生在高分子合成、结构表征及性能分析方面的综合能力。具体教学目标如表 1~3 所示:

(1) 知识目标: 掌握阳离子聚合的基本原理与含氟单体降低介电常数的作用机制。

Table 1. Knowledge objective decomposition table
表 1. 知识目标分解表

知识目标要点	具体内容	评价标准
阳离子聚合机理	理解阳离子聚合的引发、增长、终止过程,掌握其与自由基聚合的区别	能准确解释催化剂(SnCl ₄)的作用及无水无氧条件的必要性
含氟单体构效关系	理解含氟基团(C-F 键)低极化率对降低介电常数的作用机制	能结合实验数据说明 OFPA 比例与介电常数、损耗之间的关联
介电性能表征原理	掌握高频 Q 表测试介电常数(ϵ)与介电损耗($\tan\delta$)的基本原理	能正确读取并解释 10 GHz 下的测试数据

(2) 技能目标: 熟练操作无水无氧悬浮聚合工艺,能够使用红外光谱、差示扫描量热及高频 Q 表等仪器进行测试与谱图解析。

Table 2. Skill goal breakdown table
表 2. 技能目标分解表

技能目标要点	具体内容	评价标准
无水无氧操作	掌握在保护气氛下处理溶剂、配制催化体系的操作规范	操作动作规范,反应体系无水无氧控制良好,无爆聚或催化剂失活
悬浮聚合工艺	能够根据配方调节单体比例与搅拌速度,控制微球形貌	产物为均匀微球,粒径分布可接受
仪器分析与谱图解析	能够使用 FTIR、DSC 进行样品测试,并识别特征峰	能正确标出 C-F 键、酯基等特征峰

(3) 素养目标: 培养基于实验数据进行构效关系分析的科研思维,强化精细化工生产中的工程意识与团队协作能力[4]。

Table 3. Literacy competency breakdown table
表 3. 素养目标分解表

素养目标要点	具体内容	评价标准
科研思维	能够基于实验现象与数据进行归纳、比较与逻辑推理	在实验报告中能独立分析构效关系,提出合理结论

续表

工程意识	理解聚合工艺中参数对产品质量的影响	能主动优化工艺参数，对异常现象提出改进思路
团队协作	在分组实验中分工合作，共同完成全流程操作与数据汇总	组内配合顺畅，报告体现集体讨论与协作成果

3. 实验原理

本实验涉及的试剂有含氟丙烯酸酯单体(OFPA)、二乙烯基苯(DVB)、四氯化锡(SnCl₄)及二氯甲烷、甲苯等溶剂；仪器包括红外光谱仪、差示扫描量热仪、高频 Q 表及真空干燥设备等。阳离子聚合是由亲电试剂引发碳碳双键进行链增长的反应，对水氧极为敏感，需在无水无氧条件下操作。本实验选用 SnCl₄ 作为阳离子聚合催化剂。在悬浮体系中，SnCl₄ 引发 OFPA 与 DVB 共聚，形成交联聚合物微球。含氟基团(C-F 键)具有低极化率特性，可降低材料在高频电场下的介电常数与介电损耗[5]。单体比例、搅拌速度、催化剂用量等因素均会影响微球的粒径分布、交联度及最终介电性能。通过对比不同配方条件下的产物结构与性能，学生可建立分子结构与宏观性能之间的构效关系[1]。

3.1. 关键实验参数的选择依据

本实验选用 SnCl₄ 作为阳离子聚合催化剂。对比 AlCl₃、BF₃·OEt₂ 等强路易斯酸，SnCl₄ 酸性适中，与体系微量水原位生成质子酸活性中心，45℃ 下平稳引发聚合，既降低爆聚风险，又与 OFPA 单体内部酯基结构有良好化学兼容性，避免强路易斯酸造成酯基分解破坏，适合本科教学实验的安全性与可重复性要求。溶剂选用二氯甲烷 - 甲苯 1:1 混合体系：二氯甲烷为极性溶剂，可以稳定阳离子活性种，抑制链终止副反应；甲苯作为非极性组分调节体系极性与黏度，适配悬浮聚合微球成球条件；单一溶剂容易出现体系黏度过大、微球粘连或者聚合速率过快爆聚问题。聚合温度设定为 45℃：温度过低，阳离子引发速率慢，聚合转化率低；温度过高，活性中心易发生链转移、链终止副反应，微球形貌变差，同时增大溶剂挥发安全风险，该温度是兼顾反应速率与产物形貌的折中条件[6]。

3.2. 教学思考题

为引导学生深入理解实验设计背后的科学逻辑，本环节设置以下思考题，供学生在课前预习和实验讨论环节进行探究。

- (1) 催化剂的选择：若改用 BF₃·OEt₂ 或 AlCl₃ 作为阳离子聚合催化剂，推测反应速率、产物分子量分布及微球形貌可能发生哪些变化？结合路易斯酸强度与酯基兼容性进行分析。
- (2) 溶剂体系：若仅使用二氯甲烷或仅使用甲苯作为单一溶剂，对阳离子活性种稳定性、体系黏度及微球成球效果分别有何影响？试从极性与溶解度参数角度解释。
- (3) 温度效应：若将聚合温度从 45℃ 降至 0℃ 或升至 60℃，对聚合转化率、链转移副反应及最终介电性能可能产生什么影响？请结合阳离子聚合的温度依赖性进行预测。
- (4) 构效关系：根据克劳修斯 - 莫索提方程，含氟基团降低介电常数的贡献主要来自分子极化率降低还是分子密度下降？如何通过实验数据进行区分和验证？

4. 实验步骤

4.1. 单体与催化体系构建

在无水无氧条件下，配制体积比为 1:1 的二氯甲烷与甲苯混合溶剂，加入干燥的三口烧瓶中。按表 4 设定的体积比分别量取 OFPA 和 DVB 单体，在氮气保护下注入反应体系，磁力搅拌均匀。催化剂 SnCl₄

按相对于 OFPA 的摩尔比 0.1 取用, 用微量注射器缓慢滴入反应瓶。所有玻璃仪器使用前需烘干, 反应装置需用氮气吹扫至少 15 分钟以排除水分和氧气。催化剂滴加过程中注意观察体系颜色变化, 配制完成后将反应瓶置于 45℃ 恒温水浴中预热 10 分钟, 待聚合反应进行。

4.2. 阳离子聚合与微球化

按表 4 设置不同 OFPA 与 DVB 体积比(0:10、7:3、8:2), 在 45℃ 下反应 20 h, 控制搅拌速度以调控微球粒径。

Table 4. Experimental groups and formula conditions
表 4. 实验组别与配方条件

组别	OFPA:DVB (体积比)	SnCl ₄ (摩尔比)	溶剂体系	温度/时间	产物外观
A 组	0:10	0.1	CH ₂ Cl ₂ /甲苯	45℃/20 h	白色固体
B 组	7:3	0.1	CH ₂ Cl ₂ /甲苯	45℃/20 h	微球状
C 组	8:2	0.1	CH ₂ Cl ₂ /甲苯	45℃/20 h	微球状

4.3. 产物后处理与纯化

聚合结束后, 将反应液冷却至室温, 加入甲醇沉淀微球。真空抽滤, 滤饼依次用甲醇和去离子水各洗涤 3 次, 除去残余催化剂和未反应单体。产物于 60℃ 真空干燥 12 h, 得到白色粉末状聚合物微球, 密封保存备用。

4.4. 性能表征

使用 FTIR 确认 C-F 键(约 1130 cm⁻¹)和酯基(1740 cm⁻¹)的特征峰; 通过 DSC 测定玻璃化转变温度(Tg); 利用高频 Q 表测试介电常数(ε)和介电损耗(tanδ); 同步采集 XRD 图谱用于分析样品结晶度变化。

5. 分析与讨论

5.1. 结构与性能分析

实验结果表明, 随着 OFPA 比例的增加, 微球的介电常数显著下降(从 2.65 降至 2.12), 介电损耗也明显降低(从 0.012 降至 0.003)如表 5 所示。Tg 从 158.4℃ 上升至 168.7℃, 表明含氟基团的引入提高了材料的热稳定性。FTIR 结果显示, 含氟基团的引入使 C-F 键特征峰明显增强, XRD 结晶度下降, 说明材料趋于无定形结构, 有利于降低介电常数[4] [5]。

Table 5. Structural characteristics and dielectric properties of typical experimental products
表 5. 典型实验产物的结构特征与介电性能

样品编号	FTIR 特征峰(C-F/cm ⁻¹)	结晶度(%)	Tg (°C)	介电常数(ε, 10 GHz)	介电损耗(tanδ)
A 组	-	12.5	158.4	2.65	0.012
B 组	1135, 1180	8.2	165.2	2.24	0.005
C 组	1138, 1185	6.5	168.7	2.12	0.003

5.1.1. FTIR 谱图分析与 C-F 键定量关联

三组样品的 FTIR 谱图均呈现典型的含氟丙烯酸酯 - 苯乙烯共聚物特征吸收。在 1730~1745 cm⁻¹ 处

出现酯羰基($\text{C}=\text{O}$)伸缩振动峰, 1600 cm^{-1} 和 1500 cm^{-1} 附近为苯环 $\text{C}=\text{C}$ 骨架振动峰, 700 cm^{-1} 附近为苯环 $\text{C}-\text{H}$ 面外弯曲振动峰, 证实 DVB 单元成功引入交联网络。含氟样品(B 组、C 组)在 $1130\sim 1185\text{ cm}^{-1}$ 范围内出现多重尖锐吸收峰, 归属于 $\text{C}-\text{F}$ 键的伸缩振动, 这是氟代烷基的特征指纹区[5]。典型的预聚物与微球 FTIR 谱图对比如图 1 和图 2 所示。

对比图 1 与图 2 可以发现: 预聚物与微球的 FTIR 谱图在主要特征峰位置上基本一致, 均含有酯羰基($\sim 1740\text{ cm}^{-1}$)、苯环骨架(~ 1600 、 1500 cm^{-1})和 $\text{C}-\text{F}$ 键($1130\sim 1185\text{ cm}^{-1}$)等特征吸收, 表明微球化过程

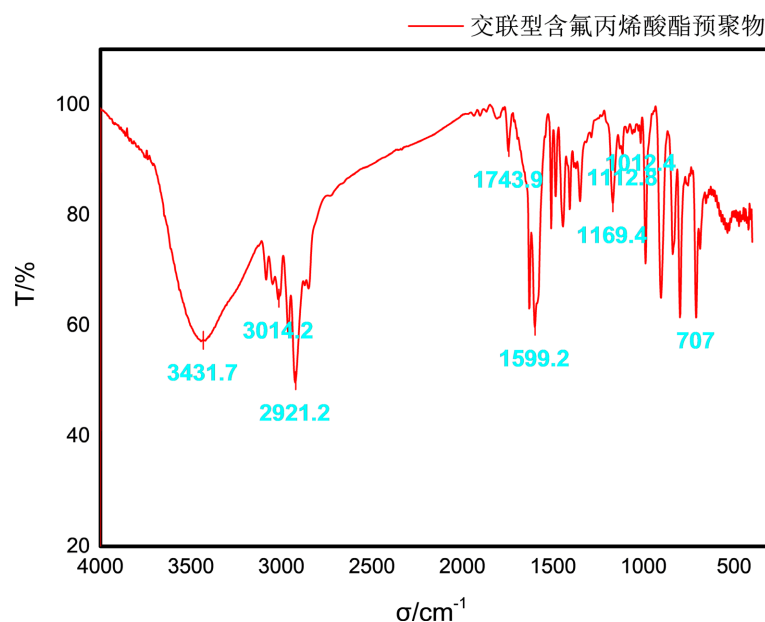


Figure 1. FTIR spectrum of a cross-linked fluorinated acrylate prepolymer

图 1. 交联型含氟丙烯酸酯预聚物的 FTIR 谱图

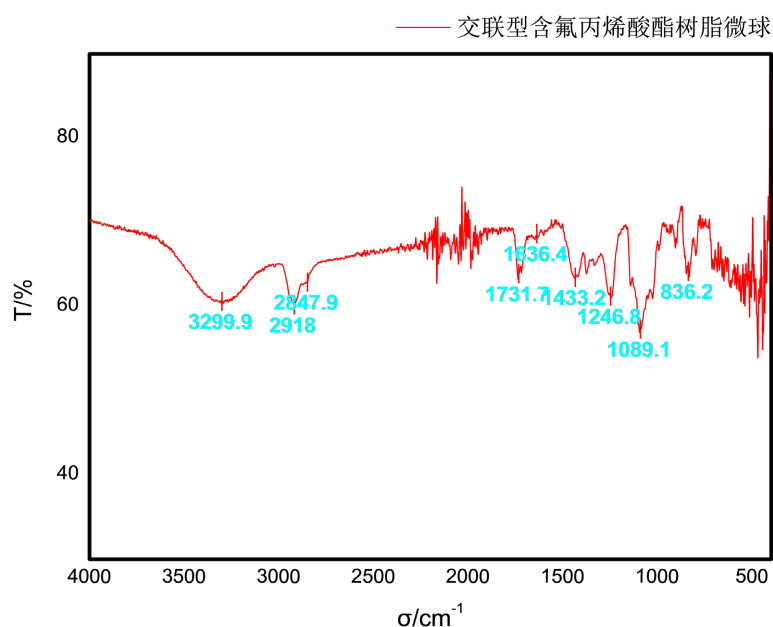


Figure 2. FTIR spectrum of cross-linked fluorinated acrylate resin microspheres

图 2. 交联型含氟丙烯酸酯树脂微球的 FTIR 谱图

(悬浮聚合、加热固化)未破坏聚合物的主体化学结构。值得注意的是,微球谱图中 1636 cm^{-1} 附近的 $\text{C}=\text{C}$ 双键伸缩振动峰强度显著减弱甚至消失,表明二乙烯基苯中的乙烯基在微球固化过程中参与了交联反应,三维网络结构得以形成。此外,微球谱图在 3299 cm^{-1} 处出现较宽的羟基($-\text{OH}$)伸缩振动峰,而预聚物谱图中该峰不明显,提示微球产物中可能残留少量聚乙烯醇(PVA)分散剂。

在三组不同配比样品的对比中,以 A 组(纯 DVB, 无 C-F 峰)为参比, B 组($\text{OFPA:DVB}=7:3$)在 1135 cm^{-1} 和 1180 cm^{-1} 处出现明显的 C-F 特征双峰; C 组($\text{OFPA:DVB}=8:2$)的 C-F 峰位进一步向高波数偏移至 1138 cm^{-1} 和 1185 cm^{-1} , 且峰强显著增强。以酯羰基峰(1740 cm^{-1})为内标进行归一化处理, C-F 特征峰与羰基峰的吸光度比值从 B 组的约 0.62 提升至 C 组的约 0.85, 与单体配方中 OFPA 体积分数从 70% 增至 80% 的变化趋势一致。这一结果表明, FTIR 中 C-F 键峰强的定量变化可作为含氟单体接入率的半定量指标,引导学生建立“投料配比-实际接入量-特征峰强度”之间的关联思维。

5.1.2. DSC 热性能与交联网络结构分析

DSC 曲线是评估聚合物热性能的重要手段。典型的含氟丙烯酸酯树脂微球 DSC 曲线如图 3 所示,曲线在 $26^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$ 范围内呈现单一的玻璃化转变台阶,无明显熔融吸热峰或冷结晶峰,表明产物为低结晶度半结晶的交联聚合物。玻璃化转变温度(T_g)取转变台阶的中点温度,教学中应引导学生掌握“基线偏移-台阶区-新基线”三段式识别方法,避免将拐点误判为 T_g 。

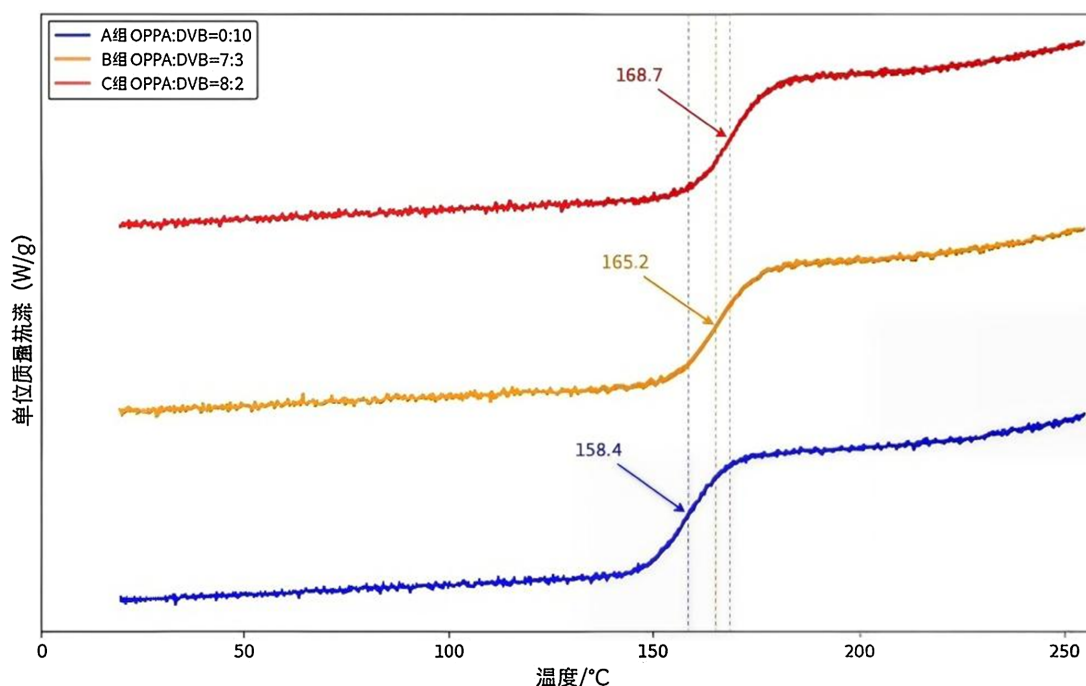


Figure 3. Comparison of DSC curves for three groups of fluorinated resin microspheres (Second heating cycle)

图 3. 三组含氟树脂微球的 DSC 曲线对比(第二次升温)

图 3 为 $\text{OFPA:DVB}=7:3$ 配比样品的代表性 DSC 曲线。对三组不同配比样品的测试结果表明, A 组(纯 DVB) T_g 为 158.4°C , B 组(7:3)升至 165.2°C , C 组(8:2)进一步升至 168.7°C , 含氟基团的引入使 T_g 提升了约 10°C 。

T_g 的升高可从交联网络结构与分子链刚性两方面解释:一方面, OFPA 单体中的含氟侧链具有较大的空间位阻,限制了聚合物主链的内旋转,提高了链段运动的能垒;另一方面, C-F 键的键能高达 485

kJ/mol, 远高于 C-H 键(414 kJ/mol), 含氟侧链的引入增强了分子链的热稳定性。此外, 含氟基团之间的弱相互作用(如 F-F 偶极相互作用)可在一定程度上起到物理交联点的作用, 进一步限制链段运动。值得注意的是, 从 B 组到 C 组, OFPA 比例仅增加 10%, T_g 增幅从 6.8℃ 收窄至 3.5℃, 提示含氟基团对 T_g 的提升存在边际效应, 可能与高含氟量下侧链结晶倾向增加、交联密度相对下降有关。这一非线性变化为学生讨论“结构-性能”关系提供了良好的教学切入点。

5.1.3. XRD 结晶度与介电性能关联分析

X 射线衍射(XRD)是判断聚合物聚集态结构的重要手段。完全无定形聚合物在 XRD 图谱中仅呈现一个宽化的弥散峰(halo 峰), 而结晶聚合物则在特定 2θ 角度出现尖锐的晶面衍射峰。教学中应引导学生掌握“弥散峰 = 无定形、尖锐峰 = 结晶”的基本判据, 并学会通过分峰拟合计算结晶度。典型的含氟丙烯酸酯树脂微球 XRD 图谱如图 4 所示。

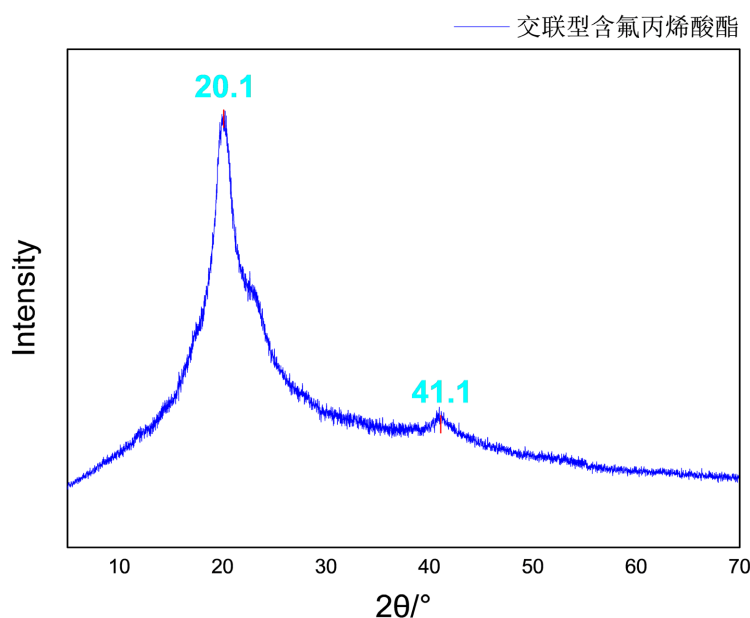


Figure 4. X-ray diffraction pattern of cross-linked fluorinated acrylate resin microspheres

图 4. 交联型含氟丙烯酸酯树脂微球的 X 射线衍射图

由图 4 可见, 样品在 $2\theta \approx 20.1^\circ$ 处出现一个较强的衍射峰, 对应晶面间距 $d \approx 0.443$ nm (由布拉格方程 $2d\sin\theta = n\lambda$ 计算, $\lambda = 0.154$ nm); 在 $2\theta \approx 41.1^\circ$ 处另有一个较弱的衍射峰, 对应 $d \approx 0.219$ nm。两个衍射峰的存在表明产物并非完全无定形, 而是以无定形相为主的低结晶度半结晶结构, 结晶区域的分子排列局部类似面心立方堆积。这一特征与含氟侧链的规整性有关——氟原子的对称排列倾向于促进局部有序, 但交联网络的无规性又限制了大尺寸晶区的形成。

对三组不同配比样品的分峰拟合结果表明, 随着 OFPA 比例增加, 结晶度呈下降趋势: A 组(纯 DVB)为 12.5%, B 组(7:3)降至 8.2%, C 组(8:2)进一步降至 6.5%。这一趋势的原因在于: OFPA 含氟侧链的不对称结构和较大空间位阻破坏了聚合物链的规整排列, 阻碍了晶区的形成和生长。从介电性能角度看, 结晶度下降对降低介电常数具有双重积极作用: 其一, 无定形区分子链排列疏松、自由体积分数较高, 根据克劳修斯-莫索提方程, 分子密度降低可直接导致介电常数下降; 其二, 结晶区与无定形区之间的界面是界面极化的主要来源, 结晶度降低意味着界面减少、界面极化减弱, 从而降低介电损耗。本实验中结晶度从 12.5% 降至 6.5% 的同时, 介电常数从 2.65 降至 2.12, 介电损耗从 0.012 降至 0.003, 三者呈现

良好的协同变化趋势。

5.1.4. 构效关系综合讨论

综合上述分析,本实验中“单体配比-分子结构-微观形貌-宏观介电性能”的构效关系可归纳为:OFPA 比例增加→聚合物链中 C-F 键密度增大(FTIR 峰强增强)→分子极化率降低、自由体积增大、结晶度下降(XRD)→链段刚性增强、T_g 升高(DSC)→介电常数和介电损耗同步降低。这一完整的逻辑链条使学生能够从分子层面理解材料性能的起源,而非仅停留在“含氟降低介电常数”的经验性结论[4]。

教学中,教师可引导学生进一步思考:若继续提高 OFPA 比例至 9:1 或更高,介电常数是否会持续下降?可能面临哪些新的问题?通过这种开放性追问,培养学生的批判性思维和科研探究能力。

5.2. 教学效果分析

为客观评估本实验的教学成效,本研究采用“前测-后测”准实验设计,选取 2022 级化学工程专业两个平行班分别作为实验班(36 人)和对照班(34 人)。两班学生在性别比例、前期高分子化学课程平均成绩、高考化学分数等方面经独立样本 t 检验均无显著差异(P > 0.05),具有良好的可比性。实验班采用本教改实验教学,对照班采用传统验证性实验教学。实验教学开始前,对两班进行阳离子聚合机理和介电常数影响因素两个知识点的前测;课程结束后,通过期末考试中相同知识的综合题进行后测。此外,课程结束后对实验班 36 名学生进行了不记名问卷调查(回收有效问卷 34 份,有效率 94.4%)。

5.2.1. 学生认知度与满意度反馈

问卷采用李克特五级量表(1 = 非常不同意, 5 = 非常同意),调查结果如表 6 所示。其中,“本实验帮助我理解了阳离子聚合与自由基聚合的本质区别”一项均分为 4.38 (同意率 91.2%);“通过对比不同配方的介电性能数据,我能清晰建立分子结构与宏观性能之间的构效关系”均分为 4.26 (同意率 88.2%);“无水无氧操作训练提升了我的规范实验意识”均分为 4.50 (同意率 94.1%);学生对实验整体满意度均分为 4.35 (同意率 91.2%)。

Table 6. Student questionnaire survey results (n = 34)
表 6. 学生问卷调查结果(n = 34)

评价项目	均分	5 (非常同意)	4 (同意)	3 (一般)	2 (不同意)	1 (非常不同意)	同意率
本实验帮助我理解了阳离子聚合与自由基聚合的本质区别	4.38	17 (50.0%)	14 (41.2%)	2 (5.9%)	1 (2.9%)	0 (0%)	91.2%
通过对比不同配方数据,我能清晰建立构效关系认知	4.26	14 (41.2%)	16 (47.1%)	3 (8.8%)	1 (2.9%)	0 (0%)	88.2%
无水无氧操作训练提升了我的规范实验意识	4.50	19 (55.9%)	13 (38.2%)	2 (5.9%)	0 (0%)	0 (0%)	94.1%
含氟单体比例调控实验设计增强了我的科研探究兴趣	4.18	12 (35.3%)	17 (50.0%)	4 (11.8%)	1 (2.9%)	0 (0%)	85.3%
对本实验课程的整体满意度	4.35	16 (47.1%)	15 (44.1%)	2 (5.9%)	1 (2.9%)	0 (0%)	91.2%

5.2.2. 考核成绩对比

在前测中,实验班和对照班在阳离子聚合机理知识点上的平均得分率分别为 52.6%和 51.3%,在介电常数影响因素知识点上分别为 48.9%和 47.2%,经独立样本 t 检验,两班在前测两个知识点上的差异均不显著(P > 0.05),表明实验教学开展前两班学生的知识基线处于同一水平。在后测(课程期末考试)中,涉及

阳离子聚合机理和介电常数影响因素两道综合题的得分率,实验班分别为 86.7%和 82.4%,对照班分别为 68.3%和 61.5%。实验班较对照班分别提高了 18.4 个百分点和 20.9 个百分点,表明本实验对学生理解核心知识具有明显的正向迁移作用[3]。上述考核得分率汇总,见表 7。

Table 7. Comparison of scoring rates on exam questions related to experimental knowledge points

表 7. 相关知识点考核得分率对比

考核知识点	对照班前测	对照班后测	实验班前测	实验班后测	增量差异(百分点)
阳离子聚合机理综合题	51.3%	68.3%	52.6%	86.7%	17.1
介电常数影响因素综合题	47.2%	61.5%	48.9%	82.4%	19.2

从学习增量角度进一步分析,实验班在阳离子聚合机理知识点上的得分率从前测 52.6%提升至后测 86.7%,增量为 34.1 个百分点;对照班从 51.3%提升至 68.3%,增量为 17.0 个百分点。在介电常数影响因素知识点上,实验班从 48.9%提升至 82.4%,增量为 33.5 个百分点;对照班从 47.2%提升至 61.5%,增量为 14.3 个百分点。经独立样本 t 检验,实验班在两个知识点上的学习增量均显著高于对照班($P < 0.01$),进一步证明本实验教学对学生核心知识掌握具有明显的正向促进作用。这一客观成绩增量与问卷调查中学生的主观感知(构效关系认知同意率 88.2%、科研兴趣增强同意率 85.3%)形成了“主观体验 - 客观成绩”双重证据链,较为全面地验证了本教改实验的教学成效。

6. 教学建议和结语

6.1. PBL 与建构主义理论在各教学环节落地

课前预习环节(PBL 问题驱动),由教师抛出产业真实问题:“5G 高频通信材料为什么需要低介电、低损耗高分子?为什么含氟结构可以实现低介电?”布置预习思考题,学生查阅文献、小组课前讨论,建构阳离子聚合基础认知。

实验操作环节(建构主义 - 动手实践):分组开展多组平行配方实验,学生自主完成无水无氧搭建、催化体系配制,教师不直接给出标准答案,引导学生观察颜色、产物形貌等现象,记录异常。

数据分析环节(PBL 探究):各组获得 FTIR、DSC、介电测试原始数据,小组内部对比不同 OFPA 配比样品,自主归纳“单体结构 - 微观结构 - 宏观介电性能”的逻辑链条。

报告撰写环节(反思建构):要求采用小论文格式,重点考核谱图解析、构效关系推理、异常现象分析,而不是单纯抄写步骤;鼓励学生提出实验改进方案。

6.2. 实验常见挑战、故障与对策

试剂纯化挑战:阳离子聚合对水极其敏感,市售溶剂、单体含水会造成催化剂失活。对策:溶剂需要提前除水蒸馏;单体低温保存;所有玻璃仪器 110℃烘干过夜,趁热组装装置。

气氛控制失效:氮气吹扫时间不足、接口漏气,会出现聚合不发生或者产物结块。对策:课前检查磨口密封,通氮气吹扫 ≥ 15 min;实验中观察尾气气泡判断氮气流通状态。

产物爆聚、粘连不成球:催化剂滴加速率过快,搅拌速率不当,温度波动。对策:催化剂微量注射器缓慢滴加;搅拌速率预实验标定;水浴温度严格控制 45℃。

表征故障:FTIR 基线漂移、DSC 样品受潮。对策:样品充分真空干燥;测试前环境干燥。

6.3. 学时与选课建议

本实验适用于大学三年级应用化学、高分子材料与工程、材料化学等专业本科生,学生需具备一定

有机化学和分子化学基础。建议总实验时长 12~16 学时，划分为 4 个模块：单体与催化体系构建、聚合与微球化、后处理与纯化、性能表征。实验前集中讲解阳离子聚合原理、含氟材料特性及安全注意事项。实验报告建议采用论文格式，重点考核谱图数据分析与构效关系逻辑推理能力[1]。

基金项目

2023 年广东省教育科学规划课题(高等教育专项)——群智共创：生态文明理念培育高质量设计类人才的新路径(项目号：2023GXJK346)；广东工业大学“2025 年校级研究生教育建设及改革创新项目——示范课程‘人工智能’专项”：AI 大模型赋能学术科研(编号：2025sfk_006)。

参考文献

- [1] 宫贵贞, 陆洋. 科教融合视域下高分子材料专业综合实验教学探索与实践[J]. 高分子通报, 2021(2): 91-96.
- [2] 朱亚辉, 蔡文溪, 宗成栋. 悬浮聚合实验的创新设计与教学实践[J]. 广州化工, 2011, 39(14): 170-171+173.
- [3] 计志娜, 张丽颖, 陈明丽, 等. 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[J]. 广东化工, 2022, 49(20): 230-231+229.
- [4] 李婷, 罗明玲, 覃峰, 等. 过渡金属配合物催化烯烃配位聚合综合实验的设计——催化剂构效关系的典型案例[J]. 化工高等教育, 2024, 41(1): 141-148.
- [5] 阴凯, 郭其阳, 张添胤, 等. 表面氟化聚苯乙烯纳米微球提升环氧树脂绝缘特性[J]. 物理学报, 2024, 73(12): 345-354.
- [6] 何宇航, 谢丹, 吕阳成. 微反应器内阳离子聚合研究进展[J]. 化工学报, 2024, 75(4): 1302-1316.