

前沿科研成果融入精细化工实验教学

——以5G高频碳氢树脂的制备与表征为例

罗洪盛, 黄桢涵, 宋小明

广东工业大学轻工化工学院, 广东 广州

收稿日期: 2026年4月18日; 录用日期: 2026年5月15日; 发布日期: 2026年5月22日

摘要

掌握5G通信用高频覆铜板基体树脂的制备与表征是精细化工实验教学的重要组成部分。本实验以4-氟苯乙烯为功能单体, 对苯二乙烯为交联剂, 通过自由基聚合反应制备功能化改性碳氢树脂。该实验教学通过前沿电子信息材料的合成与性能评价, 帮助学生掌握高分子合成、纯化及结构表征等实验技术, 培养其科研思维和解决复杂工程问题的能力。学生在实验过程中不仅能学习专业知识, 还能提升对国家重大战略需求材料的认知, 为其今后开展高端精细化学品研发奠定基础。

关键词

实验教学, 5G通信, 碳氢树脂, 自由基聚合, 改性

Integration of Cutting-Edge Scientific Research Achievements into Fine Chemical Engineering Experimental Teaching

—A Case Study on the Preparation and Characterization of High-Frequency Hydrocarbon Resin for 5G Applications

Hongsheng Luo, Zhenhan Huang, Xiaoming Song

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

Received: April 18, 2026; accepted: May 15, 2026; published: May 22, 2026

Abstract

Mastering the preparation and characterization of high-frequency copper-clad laminate matrix

resin for 5G communication applications constitutes a vital component of fine chemical engineering experimental education. This experiment utilizes 4-fluorostyrene as the functional monomer and divinylbenzene as the cross-linking agent to synthesize functionalized modified hydrocarbon resins through free radical polymerization. By integrating the synthesis and performance evaluation of cutting-edge electronic information materials, the experimental teaching approach equips students with essential polymer synthesis techniques, purification methods, and structural characterization skills, while fostering scientific research thinking and problem-solving capabilities for complex engineering challenges. Through this process, students not only acquire professional knowledge but also deepen their understanding of materials critical to national strategic needs, laying a solid foundation for future high-end fine chemical R&D endeavors.

Keywords

Experimental Teaching, 5G Communication, Hydrocarbon Resin, Free Radical Polymerization, Modification

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

在新工科建设与高等教育高质量发展的背景下,开展兼具前沿性、综合性与挑战性的实验教学,已成为化工类专业课程改革的核心方向。精细化工实验作为化学工程与工艺、应用化学等专业的核心实践环节,承担着培养学生工程实践能力与科研创新素养的核心使命。研究型教学是以问题为导向、以学生为主体,将科研思维与方法融入教学全过程,引导学生通过自主探究完成知识建构与能力提升的教学模式,是当前国内外高等工程教育改革的核心路径。在化学工程教育领域,国内高校已开展大量相关探索,但现有研究仍存在明显局限,比如:多数成果聚焦于单一实验知识点的优化或传统验证性实验的改进,较少实现前沿科研成果从分子设计、合成制备到性能评价的全链条教学转化;部分教学方案缺乏系统的教育理论支撑,未明确与传统教学模式的核心差异,难以形成可复制、可推广的标准化教学范式。与此同时,传统精细化工实验教学仍存在突出短板:教学内容多以验证性实验为主,与飞速发展的工业前沿技术脱节;教学模式以教师单向灌输、学生按步骤操作为主,难以激发学生的独立思考与创新设计能力,无法有效培养学生解决复杂工程问题的能力。当前,全球通信技术加速迈入5G及后5G时代,信号传输频率的大幅提升,对高频覆铜板基体材料的介电性能提出了严苛要求——需具备极低的介电常数与介电损耗,以保障信号传输的高保真与低延迟。碳氢树脂凭借其高度非极性的分子结构,展现出优于传统环氧树脂的介电特性,已成为高性能电子封装领域的核心研究方向;而如何通过化学改性平衡其力学性能、热稳定性与加工活性,仍是当前高端电子化学品研发的核心技术难点[1][2]。基于此,本校通过科研反哺教学的路径,将5G高频碳氢树脂制备这一前沿科研课题,系统转化为本科精细化工综合实验项目。

本文的核心贡献分为两个维度,首先是构建了基于OBE成果导向教育理念与建构主义学习理论的四阶段螺旋上升式研究型教学模式,形成了可复制、可推广的科研成果教学转化范式;其次是开发了一套完整、可验证、符合本科教学规范的5G高频碳氢树脂制备与表征实验方案。本文系统阐述了该教学方案的理论基础、设计逻辑、实施流程与考核体系,旨在为化工类专业前沿科研成果融入实验教学提供参考,为高素质复合型精细化工人才培养提供实践支撑。

2. 实验教学设计方案

所采用的设计方案适用于本科教学，具体而言，围绕 5G 高频碳氢树脂制备实验开展方案开发，并配套设计全流程研究型教学模式，实现前沿科研成果向实验教学的转化。

2.1. 教学目标

本实验以 5G 通信用关键基体材料 - 高频碳氢树脂的制备为研究对象，通过完整的科研转化教学流程，使学生深入了解高端电子化学品研发的全过程[3]。本实验旨在通过系统的科研训练，实现基础知识 - 工程思维 - 创新素养的多维培养。本课程旨在实现以下三个关键目标：

教学目标一：文献调研与信息整合能力培养。通过系统的文献调研，培养学生获取、分析和整合前沿科研信息的能力，使其了解行业动态并掌握科学研究的基本方法论。

教学目标二：实验方案设计与工程思维能力培养。通过对方案的设计与优化，培养学生将精细化工理论转化为实际工艺方案的能力，锻炼其严谨的工程思维，学会全面权衡反应转化率与产物性能之间的关系。

教学目标三：团队协作与沟通表达能力培养。互动式教学不仅培养了学生的团队合作精神和批判性思维，还提升了其汇报展示与语言表达能力，使其学会在集体协作中发挥个人优势，为未来从事精细化工研发工作奠定职业素养基础。

2.2. 教学内容

本实验的核心教学内容聚焦于结构定向设计 - 聚合工艺控制 - 性能表征评价这一完整的精细化学品研发逻辑。为了让学生深刻理解 5G 高频通信对低介电材料的本质需求，教学内容分为以下三个层次。

2.2.1. 分子结构设计与材料改性原理

教学中重点引入极化率概念。通过对比分析，引导学生理解为何引入氟原子能有效降低高分子的摩尔极化率，从而降低介电常数。同时，探讨利用对苯二乙烯作为交联剂构建三维网络结构的意义，即在不显著增加介电损耗的前提下，通过提高交联密度来增强碳氢树脂的热稳定性和机械强度，解决其在覆铜板应用中的剥离强度不足问题。

2.2.2. 聚合工艺的选择与优化策略

实验教学涵盖了四种主流的高分子合成与改性技术方案(见表 1)。基于碳氢树脂单体的挥发性、反应放热特征及教学实验室的安全要求，本实验选定自由基聚合作为核心工艺。

Table 1. Comparative analysis of synthesis and modification methods for electronic-grade polymer resins

表 1. 电子级高分子树脂合成与改性方法对比分析

方法名称	反应机理	优缺点分析	5G 材料适用性
本体聚合	单体在引发剂下直接聚合	散热难，易爆聚，产物纯度高	适用于简易模型合成
溶液聚合	以 THF 等为溶剂，降低体系粘度	散热容易，转化率中等，需回收溶剂	本实验首选方案
悬浮聚合	单体分散在水中成液滴	产物为颗粒状，后续清洗复杂	适用于大规模工业生产
共混改性	物理掺杂陶瓷或氟粉	工艺简单，但易导致介电不均	辅助性能调节手段

2.2.3. 自由基聚合的调控机制

溶液聚合过程遵循链引发、链增长和链终止的自由基机理。教学重点包括：渗透与均相化、氢键与

疏水交互、浓度梯度与交联效率。实验设计了两步加料法，初提阶段控制功能单体聚合，后期补加交联剂，基于浓度梯度差实现均匀交联，最大限度提升产物的耐热性。该教学内容设计兼顾了学术严谨性与教学的可操作性，旨在引导学生从理解分子到创造材料，体现了前沿科研成果向实验教学转化的核心价值。

2.3. 实验流程

本实验遵循单体预处理 - 溶液聚合 - 交联改性 - 分离表征的标准化科研流程，确保实验结果的可重现性与教学操作的规范性。

2.3.1. 原料预处理与体系构建

本实验采用四步标准化准备程序。首先是单体除杂，去除阻聚剂，确保聚合活性；然后引发剂精制，采用乙醇重结晶法纯化，置于4℃避光保存，防止其受热分解；其次是溶剂脱水，经分子筛干燥处理，使其水分含量控制在0.01%以下，避免副反应干扰；最后是反应环境营造，将反应体系进行真空 - 充氮循环三次，建立严格的无氧环境，消除氧气对自由基聚合的抑制作用。

2.3.2. 两步法分段聚合工艺

实验采用精密控温的分步策略，以实现树脂分子链结构的有效调控。在初提聚合阶段，准确称取反应物和引发剂。在氮气保护下，开启恒温磁力搅拌，并升温和恒温进行反应。在交联阶段，向预聚体系中滴加交联剂，然后将反应温度精准上调，利用双官能团特性引发扩链与交联反应，持续反应，直至体系粘度明显增加，形成具有三维网络结构的改性碳氢树脂。

2.3.3. 产物纯化与质量控制

为获得高纯度教学样品，严格执行纯化步骤。首先是沉淀分离，将反应后的黏稠液体缓慢滴入过量的沉淀剂无水甲醇中，通过极性差异使高分子树脂析出，可以有效去除未反应的单体和残留引发剂。然后是梯度干燥，将产物经布氏漏斗抽滤后，置于真空干燥箱中处理，确保挥发性溶剂完全脱除，防止对后续介电性能测试产生干扰[4]。

2.3.4. 产物结构表征($^1\text{H-NMR}$)

采用核磁共振氢谱对产物结构进行表征，典型谱图如图 1~3 所示。

图 1 为最优实验条件下的目标产物谱图；其 δ 7.5~8.0 ppm 为氟代苯环邻位氢特征峰， δ 7.0~7.5 ppm 为苯环氢多重峰， δ 1.5~3.0 ppm 为聚合物饱和烷基主链峰，无残留烯氢、无明显溶剂与引发剂杂质峰，结构与目标氟改性碳氢树脂完全一致。

图 2 为交联不完全样品谱图；其 δ 5.5~6.5 ppm 出现明显烯氢双键信号，可用于教学中讨论反应程度、交联效率与工艺参数的关系。

图 3 为后处理最优、纯度最高的样品谱图；其溶剂峰微弱、无双键残留，峰型规整，表明聚合物结构均匀、杂质含量低，可作为本科教学实验的标准参考谱图。

2.4. 实验教学设计

本实验依托科教融合理念，以 OBE 成果导向教育与研究型教学理论为核心支撑，将前沿的 5G 通信材料科研成果转化为教学项目，采用四阶段螺旋上升式教学法。区别于传统验证性实验“教师讲、学生做”的单向灌输模式，本方案以学生为主体，突出自主设计与探究式学习，旨在实现从理论认知到工程实践的深度迁移。在研讨阶段，首先通过理论微课引入 5G 通信对介电材料的核心要求，讲解 4-氟苯乙烯单体在降低分子极化率中的作用机理。教师引导学生开展启发式讨论，引导学生思考如何通过调节交联剂对苯乙烯的比例来平衡材料的加工性与热稳定性，通过预习报告与小组讨论掌握学生对核心理论

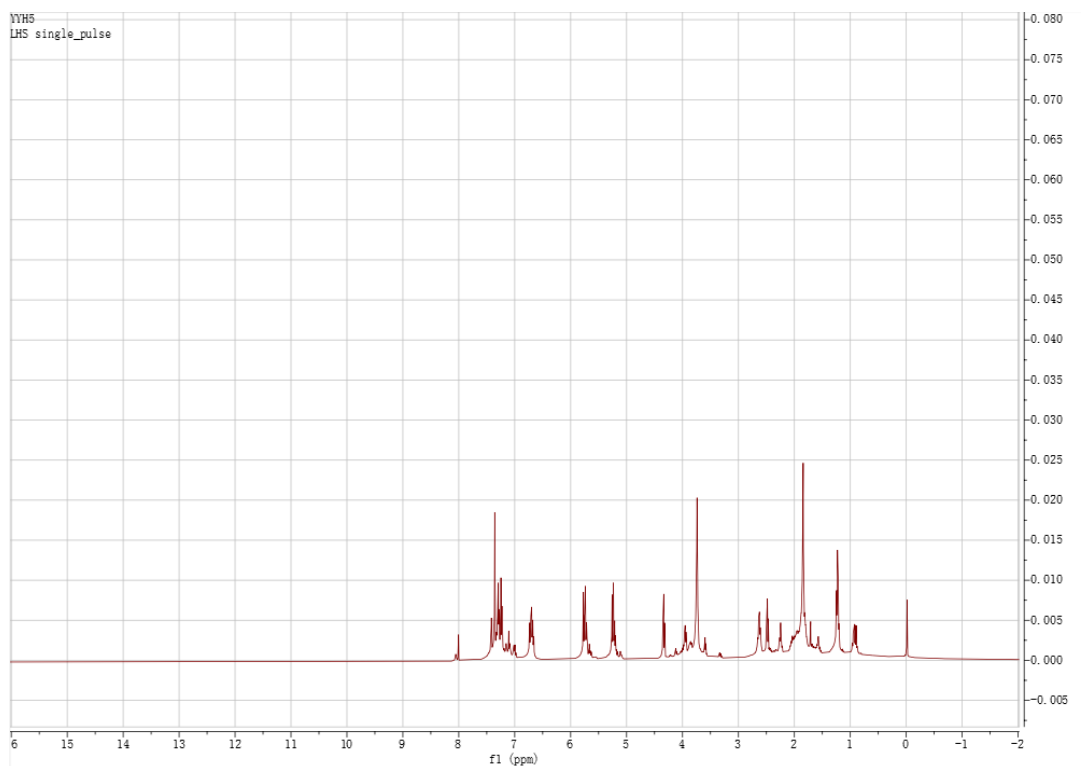


Figure 1. Nuclear magnetic resonance hydrogen spectrum
图 1. 核磁共振氢谱图

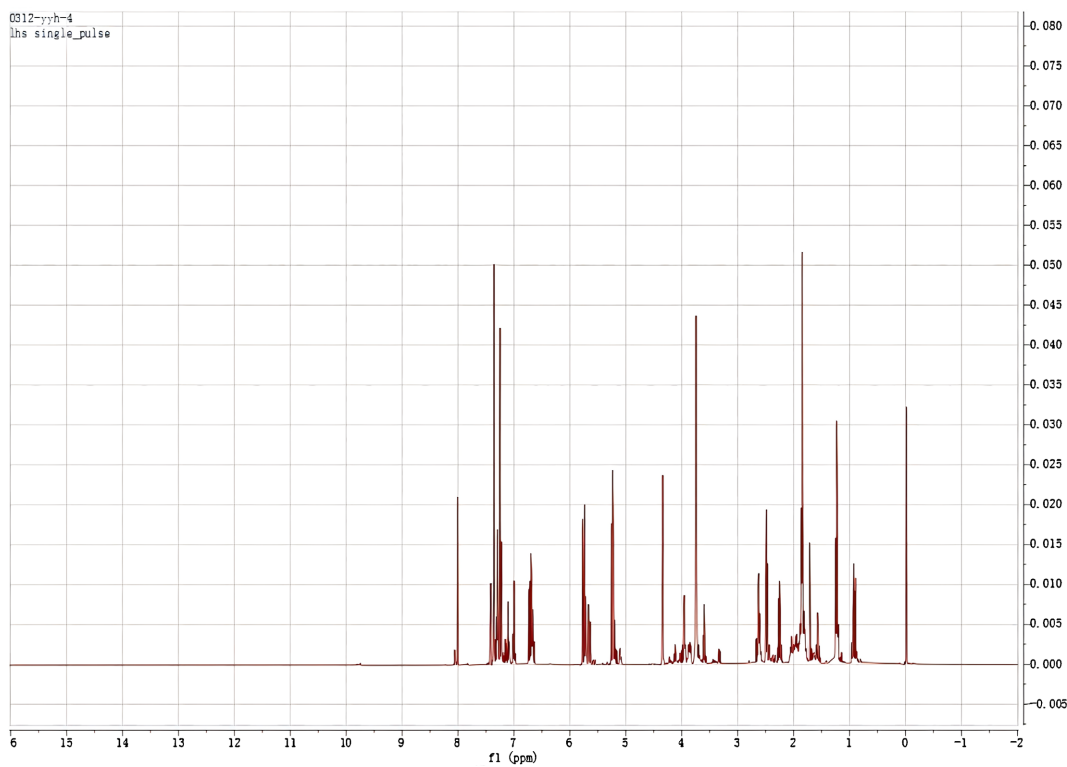


Figure 2. Nuclear magnetic resonance hydrogen spectrum
图 2. 核磁共振氢谱图

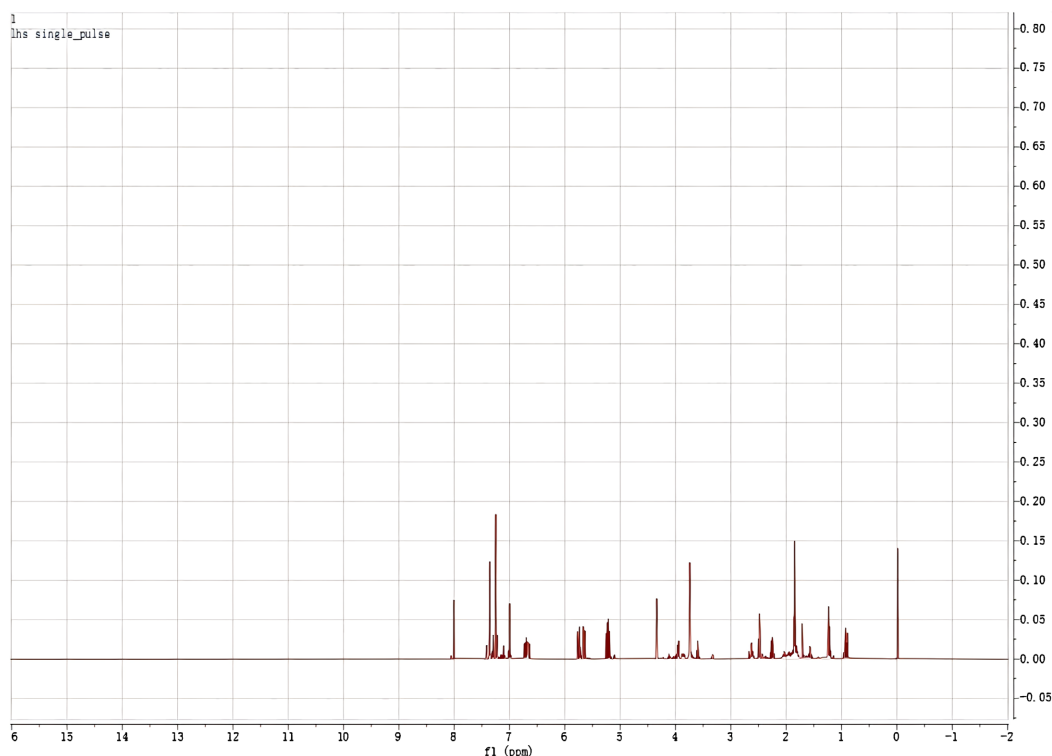


Figure 3. Nuclear magnetic resonance hydrogen spectrum

图 3. 核磁共振氢谱图

的理解程度，开展针对性引导；学生需基于文献调研撰写预习报告，初步构建实验思维模型。在示范阶段，教师需进行标准化操作演示，重点展示自由基聚合反应中氮气置换排氧、恒温磁力搅拌器的精确控温以及滴加单体速率的控制策略，针对学生操作难点开展一对一答疑。特别强调高分子实验中的安全规范，如有机溶剂的回收处理及引发剂的低温避光保存，培养学生严谨的职业素养。在实践阶段，实验采用 2~4 人小组合作制，学生根据自拟方案进行实操。在聚合阶段，学生需实时观察反应液黏度的变化；在纯化阶段，掌握溶剂与非溶剂沉淀法提取高聚物的技术要点。教师在此过程中进行巡回指导，鼓励学生记录异常实验现象，组织小组讨论分析问题成因，引导其从反应动力学角度提出解决方案。在总结阶段，教师指导学生利用核磁共振对产物结构进行确认，对比不同单体比对产物特征峰强度的影响。各小组需整理数据并制作 PPT 进行课堂汇报，分享实验成功经验或失败教训，汇报后设置学生交叉质证与互评环节。教学反馈显示，该“做中学、评中悟”的闭环设计，不仅检验了学生对知识的掌握程度，更显著提升了其分析解决复杂精细化工问题的能力。

3. 教学考核与建议

3.1. 教学建议

本实验项目具有较强的综合性与前沿性，建议教学安排在本科三年级下学期或四年级上学期，总学时设置为 8~10 学时。第一步是学生开展启发式文献调研，在实验开展前 2 周发布预习任务，引导学生利用学术数据库，针对 5G 通信材料、低介电常数与低介电损耗设计原理进行文献检索。要求学生理清分子结构 - 材料性能 - 工业应用之间的逻辑关系，从接受式教育向创新式教育转变。第二步实施师生身份互换教学，改变传统的教师单向灌输模式，组织实验方案讨论课。鼓励学生走上讲台，汇报各小组设计的聚合配比、引发剂用量及控温策略。通过双向沟通了解学生对自由基聚合机理的理解深度，建立良好的

教学氛围，由教师进行针对性的启发与纠偏。第三步强化科研素养与数字化赋能，在实验过程中，教师应引导学生关注氮气保护、减压蒸馏、真空干燥等关键操作对产物纯度及最终性能的影响。同时，建议引入 AI 大模型或化学模拟软件，辅助学生进行核磁共振谱图的预测与数据分析，提升其利用数字化工具解决科研问题的能力。

3.2. 教学考核

实验考核采取多元化的综合评价模式，由教师评估、学生自评及小组互评共同完成。评价维度聚焦于实验方案的科学性、操作的规范性、团队协作水平以及报告的分析深度。见表 2 所示。

Table 2. Evaluation-assessment-proportion allocation table

表 2. 评估 - 考核 - 占比分配表

评价维度	考核指标	占比
实验方案设计能力	方案设计的可行性、创新性；文献调研的深度与前瞻性	15%
操作规范性与熟练度	聚合反应控温精准度、无氧操作规范性、仪器使用熟练度	25%
汇报展示与交流协作	小组讨论表现、PPT 汇报效果、团队分工与协作贡献	30%
实验报告严谨性与深度	实验记录完整性、 ¹ H-NMR 谱图解析准确度、误差反思深度	20%
贯穿始终的科学素养	实验室安全意识、绿色化学意识、学术诚信与科研态度	10%

4. 总结

掌握 5G 通信用高频碳氢树脂的制备、功能化改性及结构表征，已成为精细化工与高分子材料实验教学体系中紧扣行业发展的重要选题方向。通过将这一前沿科研成果深度转化为教学实验，不仅能够系统性地锻炼学生在有机合成、精密聚合反应控制及复杂产物纯化等方面的核心基础知识与工程操作技能，更显著增强了其针对多维实验数据的逻辑分析与深度处理能力。在实际教学过程中，本实验项目坚持以专业能力培养为导向，通过引入 4-氟苯乙烯和对苯二乙烯等功能单体，极大地强化了学生对分子结构调控宏观性能这一核心化学逻辑的直观理解与应用。该实验模式有效拓宽了学生的学术视野，使其完整经历从专业文献调研、实验方案优化到产物性能评价的标准化科研全流程，还依托小组协作机制，在攻克技术难题的过程中显著提升了学生的实践创新水平与团队沟通协作精神。此外，本课程的开展对于引导学生关注电子信息材料领域的技术难点、提升高性能基体材料的研发兴趣具有重要的教育意义[5]。随着通信技术向更高频段挺进，具备低介电常数与极低介电损耗特性的高性能树脂展现出巨大的研究价值，本实验教学模式的成功探索与推广，为培养具备行业竞争力的精细化工高素质复合型人才奠定了坚实基础，充分展现了科研转化教学在人才培养中的高效路径。

基金项目

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] 王兴艳. 我国高频覆铜板发展现状分析[J]. 新材料产业, 2022(1): 38-41.
- [2] 苏晓渭, 赵海波, 王成勇, 等. 高频高速通信覆铜板信号损失分析及研究进展[J]. 电子与封装, 2021, 21(11): 56-61.
- [3] 李会录, 夏婷, 苏建锋, 等. 碳氢树脂高频覆铜板的研究进展[J]. 绝缘材料, 2024, 57(1): 1-8.

- [4] 康瑞瑞, 李陈郭, 李至秦, 等. 碳氢树脂在高固体分环氧涂料中的应用研究[J]. 材料开发与应用, 2018, 33(6): 87-94.
- [5] 秦伟峰, 刘俊秀, 陈长浩, 等. 无卤高频碳氢覆铜板的设计及性能研究[J]. 印制电路信息, 2023, 31(5): 11-15.