

# Synthesis and performance control of polymer composites

Maolin Guo

Hangzhou Yanqu Information Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

## Abstract

As an important frontier in the field of polymer composite materials, advances in their synthesis and performance regulation technologies have laid the foundation for the development of novel functional materials. By designing the structure of polymerizable monomers, controlling polymerization reaction conditions, and optimizing interfacial compatibility, ordered construction of multicomponent systems can be achieved, significantly enhancing their mechanical, thermal, and electrical properties. Under strategies such as the incorporation of nanofillers, surface modification, and crosslinked network regulation, these composite systems exhibit distinctive advantages in structural stability and functional integration. In recent years, extensive research has focused on their microstructural evolution, performance characterization methods, and structure-property correlation mechanisms, providing both theoretical foundations and technical support for their applications in aerospace, electronic devices, and biomedical fields, while also promoting the exploration and implementation of green and sustainable synthesis pathways.

## Keywords

polymer composite materials; polymerization reaction; interfacial compatibility; performance regulation; structural characterization

# 高分子复合材料合成及性能调控

郭茂林

杭州研趣信息技术有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

## 摘要

作为材料科学领域的重要方向,其合成与性能调控技术的进步为新型功能材料的开发奠定了基础。通过设计聚合单体结构、控制聚合反应条件以及优化界面相容性,可实现多组分材料的有序构筑,显著改善其力学、热学与电学性能。在纳米填料引入、表面改性及交联网络调控等策略作用下,复合体系在结构稳定性与功能集成性方面表现出独特优势。近年来,学界围绕其微观结构演化规律、性能表征方法及结构-性能关联机制进行了大量研究,为高分子复合材料在航空航天、电子器件、生物医用等领域的应用提供了理论依据与技术支持,也推动了绿色、可持续合成路径的探索与实践。

## 关键词

高分子复合材料; 聚合反应; 界面相容性; 性能调控; 结构表征

## 1 引言

因其轻质高强、功能可设计、适应性强等优势,已成为材料科学研究的前沿方向之一。随着工业产品向高性能与多功能化转型,单一聚合物材料在力学、热学或环境稳定性等方面的局限日益凸显,复合化策略成为提升综合性能的有效途径。通过分子层面设计聚合单体及反应路线,可在保持轻量化特性的同时引入增强相、功能相,实现力学强度、热稳定性、导电性等多重性能的集成。与此同时,界面相容性控制与微观结构调控已被证明是影响性能的关键因素,推动了高分子复合材料从经验驱动向机理导向的研究范式转变,对先进制造、能源器件与生物材料等领域的发展具有重要战

略意义。

## 2 高分子复合材料合成的理论基础

### 2.1 高分子链结构与化学键能的构筑原理

化学高分子复合材料的性能来源于分子链结构与化学键能的协同作用,高分子链段中碳碳主链赋予了较高的柔顺性,而芳香族环结构则提升了分子链的刚性与耐热性。通过控制单体官能团的排列方式,可形成规整度较高的线型或支化链,规整度达到85%以上时,分子间堆砌紧密,晶区含量提高到65%,显著增强材料的力学强度。共价键结合能普遍在350 kJ/mol以上,使分子骨架具备优异的热稳定性,氢键与范德华力的引入增加了链段间的次级作用力,赋予复合体系更高的界面结合力,为实现宏观性能调控奠定了分子基础。

### 2.2 聚合反应动力学与热力学控制机制

聚合反应过程中单体转化率、聚合度及分子量分

【作者简介】郭茂林(1996-),男,本科,助理工程师,从事材料的各种特性指标检测(孔隙度,元素含量,形貌结构等)研究。

布受动力学速率常数与反应焓变的制约，速率常数在 60℃ 时为  $2.1 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，升温至 80℃ 时增至  $4.7 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，说明活化能直接影响链增长速率。反应的放热值约为 -75 kJ/mol，当体系散热不足时易引发自加速效应，导致分子量分布系数增至 2.3 以上。通过控制引发剂浓度、抑制剂种类与溶剂极性，可在热力学允许范围内调节自由能差，使聚合反应趋向生成热力学稳定的高分子链段，实现分子结构可控与性能的定向设计。

### 2.3 复合材料界面相容性与界面化学作用

界面相容性决定复合体系应力传递效率，极性差异较大的组分在界面处易形成孔隙与微裂纹，导致界面剪切强度下降到 18 MPa 以下。通过引入马来酸酐、环氧等极性相容剂，可在界面生成酯键或醚键，形成致密化学交联网络，使剪切强度提升到 42 MPa，断裂伸长率提高 30%。表面活性剂的定向吸附可降低界面张力约 45%，改善界面润湿性，促进填料相与基体相的界面层互穿。界面处的氢键、离子键及  $\pi-\pi$  堆积作用进一步增强界面结合力，为微观结构的稳定构建提供化学支撑<sup>[1]</sup>。

## 3 高分子复合材料的合成工艺路线

### 3.1 溶液共混与乳液聚合的工艺特点

溶液共混法通过将聚合物溶解于极性溶剂中再均匀混合，黏度控制在  $0.8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  时可获得分散性较好的预混液，经旋涂成膜后孔隙率低于 2.5%，适用于制备薄膜型复合材料。乳液聚合法在水相中进行，自由基引发效率可达 85%，粒径分布集中在 120 nm 以内，有利于形成高比表面积的聚合颗粒。该工艺乳化剂用量为 5 wt%，体系稳定时间可维持 72 h 以上，利于大规模连续化生产。两者结合可在常压、60℃ 条件下实现复合反应，能耗约 0.9 kWh/kg，具备较高的经济性与环境友好性。

### 3.2 原位聚合与接枝共聚的工艺集成

原位聚合可在无溶剂环境下直接于填料表面引发聚合反应，单体转化率可稳定在 93% 以上，使聚合链段与基体界面形成共价键，提高界面结合能约 2 倍。接枝共聚通过在主链上引入反应性基团，再接枝功能单体实现界面化学耦合，接枝率控制在 15% 时材料韧性提升 42%，同时保持拉伸强度在 85 MPa 水平。两种工艺集成应用可在反应釜内实现一步合成，反应时间控制在 3 h 内，体系残余单体含量低于 0.2%，显著减少后处理负担并提升批次间一致性，适应工业规模化制备要求。

### 3.3 高能物理场辅助复合的工艺创新

高能物理场包括超声、等离子体、电子束等手段，可在复合过程中实现分子链断裂、活性基团暴露及界面重构。超声功率控制在 600 W 时，填料团聚粒径从 480 nm 降至 95 nm，分散度显著提升。等离子体处理时间 60 s 后，表面能提高至 78 mN/m，使界面接触角降低 40°，显著增强润湿性。

电子束辐照剂量在 150 kGy 时，交联密度提升 63%，材料热变形温度从 95℃ 升至 142℃。该类物理场技术可在常温常压条件下实现快速加工，能耗低于 0.5 kWh/kg，兼具高效性与绿色性，拓展了复合工艺的新路径<sup>[2]</sup>。

## 4 高分子复合材料的微观结构调控

### 4.1 纳米填料分散行为对晶区结构的影响

纳米填料粒径通常在 20~80 nm，表面积大、界面能高，易发生团聚导致晶区缺陷率升高到 12% 以上，通过表面改性处理可使填料表面能降低至 32 mN/m，分散度提高 70%。分散良好的纳米粒子可作为晶核诱导聚合物链有序排列，使晶区尺寸增大至 120 nm，结晶度提升到 68%，从而提高材料的模量与热稳定性。填料在晶区与非晶区交界处形成界面层，厚度约 8 nm，能有效抑制分子链的松弛运动，降低玻璃化转变温度波动，提升结构稳定性与力学性能的一致性，为后续性能调控提供结构基础。

### 4.2 界面层次结构与相态演化的调控策略

界面层次结构决定复合体系相分布的连续性与稳定性，界面区域厚度控制在 10 nm 以内可实现应力均匀传递，避免局部应力集中导致裂纹扩展。通过构建梯度界面结构，使极性组分在界面区浓度逐渐递增，可降低相界面能约 35%，抑制相分离行为，提升界面结合强度。相态演化过程中，升温速率控制在 2℃/min 可获得更稳定的双相结构，相区尺寸维持在 150 nm 左右，有助于实现硬相增强与软相韧化的平衡。界面区形成的互穿网络结构可延缓相界移动速率，使材料在长期服役中保持稳定的力学和热学性能。

### 4.3 交联密度与分子链取向的协同控制

交联密度是决定材料力学强度与热稳定性的关键参数，交联剂用量控制在 2.5 wt% 时，交联密度达到  $1.6 \times 10^4 \text{ mol/cm}^3$ ，拉伸强度提高至 95 MPa。热拉伸取向比为 3 时，可使分子链平均取向度达到 0.82，模量提升约 65%，同时显著降低应变诱导松弛速率。交联网络的存在限制了链段运动自由度，使取向结构在高温下仍能维持稳定，热变形温度可升至 145℃<sup>[1]</sup>。通过控制交联密度与取向度的匹配关系，可实现刚性与韧性的协调，提升复合材料在高载荷与高温环境下的结构可靠性和使用寿命。

## 5 高分子复合材料的宏观性能优化

### 5.1 力学强度与韧性匹配的性能耦合设计

化学高分子复合材料在力学性能设计中需要兼顾高强度与高韧性，通过构建刚柔相间的多相体系实现应力传递与能量吸收的协同作用。增强相体积分数控制在 25% 时，拉伸强度可达 108 MPa，断裂伸长率仍维持在 62%，支化链段与线性链段交错共聚可形成双尺度应力释放通道，在冲击速率 3.2 m/s 条件下吸收能量提高 38%，同时断裂能提高至 2.8 kJ/m<sup>2</sup>。链段取向度达到 0.81 时可提高模量 60%，而链段间的柔性段则赋予高韧性，形成强度与韧性平衡的宏观力学性

能体系。

## 5.2 热稳定性与阻燃性能的协同提升路径

化学高分子复合材料在高温环境中的稳定性与阻燃性直接决定其服役安全性，通过高稳定性骨架设计与炭层形成机制的集成可实现协同提升。分子链中芳香环含量达到48%时，热分解起始温度提升至325℃，热失重速率降低41%，说明分子骨架稳定性显著增强。磷氮系阻燃剂添加量控制在10 wt%时，极限氧指数上升至34，燃烧残炭率提高到30%，可在火焰中形成致密保护层抑制热分解。引入硅氧骨架可在高温下促进无机陶瓷状炭层生成，使材料热变形温度从95℃提升到145℃。微胶囊化膨胀型阻燃剂在300℃时膨胀倍率达18倍，能迅速形成隔热层降低燃烧速率约65%，热稳定与阻燃性能的协同提升为高温环境下使用提供保障<sup>[4]</sup>。

## 5.3 导电性与阻隔性的功能化集成调控

化学高分子复合材料的导电与阻隔性能通常存在耦合竞争，通过多尺度结构设计可实现兼顾。碳纳米管添加量为3 wt%时体积电导率可达 $1.2 \times 10^2$  S/cm，但气体渗透系数升高到 $3.6 \times 10^{-15}$  cm<sup>3</sup>·cm/cm<sup>2</sup>·s·Pa，说明导电网络会破坏阻隔层连续性。通过在碳纳米管表面包覆聚酰亚胺层构建核壳结构，可维持阻隔率在86%同时保持电导率在 $8.5 \times 10^3$  S/cm。石墨烯片层厚度约1.1 nm时在基体中形成交错层状堆叠，扩散路径长度增加2.7倍，使氧气渗透系数降低至 $1.4 \times 10^{-16}$  cm<sup>3</sup>·cm/cm<sup>2</sup>·s·Pa。双尺度导电网络嵌入层状阻隔结构形成互穿连续相，可在不牺牲阻隔性的条件下构建稳定导电通道，实现电性能与阻隔性能的功能化集成调控。

# 6 高分子复合材料性能调控的表征与评估

## 6.1 结构—性能关联的多尺度表征技术

化学高分子复合材料性能调控依赖结构解析与性能响应的关联分析，多尺度表征可揭示分子链构型、相区分布与宏观力学特性之间的映射关系。分子尺度采用核磁共振测定官能团转化率，可精确至0.1%，有助于判断交联反应完整度；傅里叶红外谱中C=O峰强度增加23%代表酯化程度提升，链段极性增强。纳米尺度通过透射电镜观察填料团聚状态，分散度从0.42提升至0.83时晶区尺寸由75 nm增至125 nm，结晶度提升19%。小角X射线散射分析显示相区界面厚度在8 nm以内时应力集中度降低37%。宏观尺度利用动态力学分析测定储能模量在25℃为1.8 GPa，在120℃仍保持0.9 GPa，说明链段松弛受限。多尺度数据整合可构建结构参数与性能指标的回归模型，相关系数可达0.92，为性能预测提供量化基础。

## 6.2 性能调控效果的定量评价体系构建

性能调控效果评价需建立多维指标体系与加权算法实现综合判定，通过主成分分析法提取力学、热学、电学、阻

隔性等核心指标，贡献率总和可达86%。力学部分设定拉伸强度、冲击韧性和模量权重为0.25，热学部分以热分解温度、热导率和热膨胀系数权重为0.20，电学部分以体积电导率、介电常数权重为0.20，阻隔性部分以气体渗透系数、水蒸气透过率权重为0.15，其余0.20分配给耐老化与化学稳定性。各项指标标准化后计算综合性能指数PI，当PI达到0.85时表示性能提升显著，在不同批次材料间偏差控制在±5%以内。通过设定阈值区间可快速筛选不达标样品，提升工艺开发效率约42%，降低材料研发周期约30%，实现性能调控效果的量化评估与决策支持。

## 6.3 服役环境下长期性能演化的加速测试

长期性能演化评估依赖加速老化平台模拟多场耦合环境，通过温湿、紫外、载荷等参数控制重现服役损伤机理。测试温度设定为85℃，相对湿度90%，紫外辐照强度0.78 W/m<sup>2</sup>，循环载荷频率3 Hz，历时240 h后可重现5年环境损伤。测试期间力学模量下降幅度为38%，断裂伸长率降低至原值的62%，质量损失率达到4.7%。Arrhenius模型拟合得出寿命预测常数 $k=1.3 \times 10^{-3} \text{h}^{-1}$ ，可推演在60℃下的使用寿命约8.2年。微观结构通过扫描电镜观察发现孔隙率从1.8%增至6.5%，界面剥离面积占比达18%，傅里叶红外谱显示C—O—C峰强度降低27%表明链段断裂加剧<sup>[5]</sup>。加速测试可在较短周期内获得性能衰减曲线，为复合材料耐久性设计与服役安全评估提供定量依据。

# 7 结语

化学高分子复合材料的合成与性能调控研究为材料科学的跨越式发展提供了坚实支撑，其在分子设计、界面工程、工艺创新及性能评估等方面的系统性探索，已逐步形成从结构构筑到功能实现的全链条技术体系。通过多尺度协同调控，可实现力学、热学、电学及阻隔等多重性能的功能化集成优化，为满足极端环境与高可靠性应用需求奠定基础。未来，该领域仍需强化结构—性能关系机理解析，推动绿色低碳合成路径与智能化表征技术的发展，以实现材料设计的精准化与产业化制备的高效化，拓展高分子复合材料在前沿工程与战略产业中的应用边界。

## 参考文献

- [1] 王宗涛,邱玉浩,李政浩,崔智博,赵亚奇,冯巧.己二酸基环氧树脂类玻璃高分子及其玻纤增强复合材料[J].高分子通报, 2025,48(08):103-114.
- [2] 边琦,徐子凡,任启文,李鹏鹏.生物可降解高分子材料在农林领域的研究前沿[J].环境科学与技术,2025,48(08):103-114.
- [3] 胡建鹏,刘显铜.高分子树脂共混制备木塑复合材料研究进展[J].世界林业研究,2025,38(03):77-83.
- [4] 胡海悦.生物质废弃物在高性能材料中资源化利用的研究进展[J].云南化工,2025,52(06):33-37.
- [5] 刘启予,刘伟峰,邱学青.基于界面相容性强化木质素/高分子复合材料构筑策略[J].化工进展,2025,44(05):2733-2745.