

新型高分子材料的设计合成与性能研究进展

王 彬 (山东祥碇邦新材料有限公司, 山东 滨州 256200)

摘 要: 新型高分子材料因其结构可编程性与功能集成性, 在智能制造、生物医用和能源器件等领域展现出广泛应用潜力。当前研究进展主要聚焦于精准分子设计、绿色可控合成路径的开发, 以及多维性能调控机制的构建, 推动材料实现结构—功能—环境的一体化协调发展。本文系统梳理了相关设计策略、合成技术与性能优化路径, 展现其从基础研究向工程化转化的关键突破。

关键词: 新型高分子材料; 精准设计; 绿色合成; 性能调控; 结构功能一体化; 研究进展

中图分类号: TQ317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 033-0001-03

Progress in the Design, Synthesis, and Performance Research of New Polymer Materials

Wang Bin (Shandong Xiangdingbang New Materials Co., Ltd., Binzhou Shandong 256200, China)

Abstract: New polymer materials have shown wide application potential in fields such as intelligent manufacturing, biomedicine, and energy devices due to their structural programmability and functional integration. The current research progress mainly focuses on precise molecular design, the development of green and controllable synthesis pathways, and the construction of multidimensional performance regulation mechanisms, promoting the integrated and coordinated development of structure function environment in materials. This article systematically summarizes the relevant design strategies, synthesis techniques, and performance optimization paths, demonstrating the key breakthroughs in their transformation from basic research to engineering.

Keywords: new polymer materials; Accurate design; Green synthesis; Performance regulation; Structural functional integration; Research Progress

高分子材料作为现代工业的基础支撑, 其性能与应用广度直接影响着多个前沿领域的发展, 传统高分子材料虽已广泛应用, 但在环境友好性、功能多样性与响应智能化等方面仍存在明显局限。随着分子工程、合成化学和材料加工技术的迅速进步, 新型高分子材料应运而生, 表现出更高的可调控性与性能集成度, 正在逐步取代传统材料, 成为推动材料科学与工程技术创新的重要力量。

1 新型高分子材料研究进展综述

新型高分子材料作为推动材料科学跨越发展的关键支撑, 其研究进展表现为结构可编程性、功能耦合性与绿色可持续性的协同推进。围绕传统材料在环境适应性、智能响应方面的不足, 国内外研究聚焦于分子结构设计优化、合成路径绿色转型及性能调控机制的深化, 已逐步实现从基础理论构建向工程转化的演进。

在设计策略层面, D-A 共轭结构、自修复网络和复杂拓扑构型成为研究热点; 合成技术方面, 活性聚合与绿色体系融合发展, 推动生物基可降解材料制备效率提升; 性能调控领域, 围绕多场响应、热电分离、环境稳定性等关键指标的研究不断取得进展。相关成果在柔性电子、生物医用、能源器件等方向实现阶段性应用, 标志着新型高分子材料正加速向产业化部署

迈进^[1]。

2 新型高分子材料的设计合成技术

2.1 可控/活性聚合技术

可控/活性聚合技术成功实现了对聚合物链结构的精准掌控, 是高性能高分子材料组建的核心依据, 以 RAFT (可逆加成-断裂链转移聚合)、ATRP (原子转移自由基聚合) 和 NMP (稳定自由基介导聚合) 为代表的典型方法, 可在温和条件里对分子量、链结构、端基以及拓扑构型达成精确调控。RAFT 聚合因为对单体适应范围宽泛且工艺简洁, 被广泛运用到嵌段共聚物、星型高分子和功能水凝胶的构建中, ATRP 于构建导电高分子一事上具有独特优势, 可以生成规整度高的聚噻吩衍生物, 实现电子迁移率及薄膜均匀性的提升, 能适配柔性电子装置及传感系统。

这些聚合方法借助调节引发剂种类、反应温度、配体结构等参数达成效果, 实现对链增长速率和活性的动态驾驭, 避免了自由基副反应导致的结构缺陷, 优化了聚合物结构可重复性以及批次稳定性, 诸如嵌段、梳形或网络结构的高分子拓扑结构, 还可凭借活性聚合的途径高效构造, 为材料功能集成搭建起平台依托。

2.2 绿色可持续合成技术

在绿色合成领域, 研究进展聚焦于反应介质与能

源效率的系统优化,力求在保持聚合效率的同时减少环境负荷。绿色合成路径突出体现资源节约、污染最小化以及过程的清洁属性,已成为高分子材料制备的核心标杆,水相聚合、无溶剂聚合与超临界 CO₂ 辅助聚合等低环境负荷工艺正逐步替代传统有毒溶剂体系,其中水相 RAFT 聚合兼具活性控制能力与溶剂安全性,在水凝胶、生物医学材料中得到广泛应用^[2]。酶催化聚合技术利用生物催化剂在常温常压下完成高选择性聚合反应,适用于聚酯、聚酰胺等天然或半合成高分子链段的构建,具备副反应少、能耗低的优势。

超临界 CO₂ 介质彰显出高扩散性与低表面张力的表现,在反应结束后可直接气化排出,极大地减少了产品纯化的难度系数,在热敏性高分子体系如聚碳酸酯、聚氨酯合成中,该路径显示出良好的介质兼容性与可回收性。绿色合成技术并非只在反应阶段体现出意义,还深入到原料抉择与产物处理范畴,采用生命周期评价(LCA)对能耗、水耗、碳排放等参数进行量化操作,助力绿色高分子材料产业实现推广。

2.3 生物基单体与可降解高分子的合成技术

面对资源紧张与环境污染的双重挑战,生物基与可降解高分子成为材料替代战略的重要方向。以乳酸、己内酯、戊二酸、柠檬酸等天然来源单体为原料,通过聚开环、缩聚或酯交换反应构建线性或交联网络结构,不仅能够保证聚合物的基本性能需求,还可在服役后实现环境中自然降解,降低“白色污染”负荷。

以聚乳酸(PLA)为例,其在具备良好力学强度和热成型性能的同时,通过分子量控制和结晶度调节,可实现从快速降解到缓释控制的多种应用路径。聚己内酯(PCL)由于其出色的柔韧性和生物相容性,被广泛用于可吸收缝合线和组织工程支架。通过与其他高分子(如 PEG、PHA)共聚或共混,可进一步扩展其性能边界,满足更复杂环境中的使用需求。生物基高分子材料在合成过程中面临着反应条件控制难、单体提纯成本高、聚合效率偏低等现实挑战。通过引入功能性引发剂、多相催化剂和动态聚合技术,可有效克服这些问题,实现对聚合反应速率、链增长方向与侧基排列的精准调控。同时,面向产业化需求的合成工艺优化,正逐步推进生物基高分子从实验室走向规模化制备,成为替代石化系聚合物的重要力量。

2.4 多功能集成型反应平台技术

面对复杂应用需求,高分子材料的合成不再局限于单功能链段的构建,而是追求结构构型、功能属性、环境适应的同步集成,反应平台技术的演进使得多步骤合成得以在单一体系中高效完成,避免了传统多釜合成中反应间的不兼容与能耗浪费^[3]。微反应器和连

续流化学技术依靠高表面积以及显著的热质传导效率构成优势,对热敏性单体、高黏度体系及中试放大领域的效率有显著提升作用。

单釜多步反应系统能够在把控 pH、温度以及原料投加节奏的基础上,逐个完成链引发、交联、后修饰等多个阶段,创建拥有梯度分布、分层响应或空间定位功能的材料体系,如利用预聚-自组装-交联三步反应,在纳米尺度范畴构建起有规律的结构,用以制造光子晶体膜、离子导体膜等新型高分子构件,大量采用模板引导反应和界面反应技术对聚合物的形貌与取向进行调控,造就成中空结构、核壳结构或是二维片状结构,提升材料于传感、过滤、储能范畴的应用功效。集成式合成平台不仅是提升高分子材料功能密度的有效路径,也为快速探索材料构效关系、构建材料数据库、实现材料智能化设计提供了基础支撑。

3 新型高分子材料的性能调控机制

3.1 力学性能调控机制

在绿色合成领域,研究进展聚焦于反应介质与能源效率的系统优化,力求在保持聚合效率的同时减少环境负荷。分子结构和微观形貌的协同影响左右着高分子材料的力学性能,借助改变主链柔顺性、侧基大小、极性和交联的紧密程度,能对拉伸强度、断裂延伸率与模量等参数进行有效掌控。半结晶体系中,结晶度和晶区取向对刚性与强度起着决定性作用,链缠结程度与自由体积对无定形体系的抗冲击及延展性能起到影响作用。从提升力学性能角度,普遍采用的方式是引入填料,碳纳米管、芳纶纤维、石墨烯等增强相在基体内部构筑起导力网络,明显增强抗拉、抗弯及抗冲击的水平,为使填料切实有效传递承载力,应在界面层构建起协同键合结构,大多会选用偶联剂修饰或者实施界面极性匹配手段。

动态交联网络结构一经引入,便为材料赋予可逆的力学响应机制,仿若双网络水凝胶将刚性断裂网络和柔性缓冲网络相融合,达成能量耗散与高韧性的协同契合,广泛用在仿生软组织、可穿戴系统等相关场景,在弹性体中采用的硫化交联、Diels-Alder 可逆交联体系,同样达成了在形变—恢复阶段结构的重组以及力学记忆能力,改善了材料服役的时长与环境适应水平。

3.2 电学与热学性能调控机制

电子与热管理领域的应用受聚合物原生绝缘性的制约,采用掺入导电填料或构建彼此连通网络的方式,是优化其导电表现的主要手段,呈现高载流子迁移率的石墨烯、碳纳米管、银纳米线等相关填料,在复合体系里面形成了电荷传输通道,实现低电阻的电通路。借助控制填料的几何形貌、分散度以及界面黏附的关

表 1 常见刺激响应高分子材料的响应参数对比

材料类型	响应类型	临界触发条件	响应时间 (s)	可逆性循环次数	应用示例	材料类型
PNIPAM 水凝胶	热响应	LCST $\approx 32^{\circ}\text{C}$	2 - 5	>500	控释、细胞分离	PNIPAM 水凝胶
聚苯胺复合膜	电致变色	0.8 - 1.5V	<1	>1000	柔性显示	聚苯胺复合膜
苝-螺吡喃聚合物	光致荧光调控	UV 365nm	<10	>300	可重写图案	苝-螺吡喃聚合物

键要素,可实现导电渗流阈值的降低,增进材料整体的导电水平,一些聚合物像聚苯胺、聚吡咯展现出本征导电性,采用掺杂剂对氧化态与共轭程度进行调控,可以实现载流子密度的调控,用于架构柔性电极、压阻传感层等。

热传导方面,声子传输效率因链结构规整度与结晶度而直接改变,PPS、PEEK 之类的线性刚性链结构在特定拉伸或诱导结晶进程中可提升链取向度,增强链内导热的效率,为构建起三维热传导的通路,时常采用球—片—线复合填料(如 Al_2O_3 微球、BN 片以及碳纳米管)搭建多尺度导热网络,通过界面耦合剂优化填料界面热阻^[4]。在电子封装、功率器件散热等应用中,导热与绝缘共存成为关键技术指标,需对填料的电介质特性以及分布路径进行协同谋划,消除电击穿隐患。

3.3 环境稳定性调控机制

高分子材料服役期间,往往会受到紫外光、氧化气氛、水分、酸碱介质等因素的干扰,极易引发链断裂、交联、表面龟裂之类的老化现象,为提升环境稳定性,需阻断自由基链式反应、构建抗降解结构且引入稳定剂体系,为达到紫外稳定,一般采用紫外屏蔽剂(如二苯酮类)、能量耗散基团(如苯并三氮唑),或者通过构建共轭 π 体系来实现能量分散,面对高温热氧的情形,可经由引入稳定共价键(如 $\text{Si}-\text{O}$ 、 $\text{C}-\text{F}$)并采用受阻酚类和亚磷酸酯类抗氧化剂,阻止高能自由基引发的链式降解现象。

在高湿度或水解敏感环境下,聚酯类材料如 PLA、PCL 易受水分侵蚀导致降解,需利用共聚疏水链段、嵌入氟化官能团以及构建疏水表面层以进行水解稳定化设计,面对微生物引起的降解风险,特别是在医用的环境以及室外环境里,能纳入金属离子、季铵盐这类抗菌成分,构筑阻隔膜进而在基体里生成释放型抑菌面,环境适应性设计涉及耐冻融、耐盐雾等性能指标的测试项目,采用湿热老化、紫外暴晒与腐蚀循环等加速试验举措,对材料服役寿命着手进行预测建模,为高可靠性应用给予数据支撑。

3.4 智能响应性能调控机制

智能响应聚合物可识别出外部物理或化学刺激,造成结构或性能的可逆转变,创建“感知—响应—调节”闭环,是实现材料智能化与功能综合的主要途径^[5]。热响应型聚合物采用引入热敏性侧基或者变动亲疏水

结构,在临界溶解温度(例如 PNIPAM 的 LCST 近乎是 32°C)周围产生相变以及体积的变动,能用于药物控释、温控致动及微流控调节。光响应材料借助像螺吡喃、偶氮苯这类光致异构的单元,可于特定波长的诱导中让构型翻转、荧光变化得以发生并实现光控表面性能,用于可重写显示和光响应器件的相关研发,如聚苯胺、聚吡咯的电响应材料可凭借掺杂调控电导状态,可被应用到柔性电子、电子皮肤及人工肌肉系统领域,不同种类的刺激响应材料具备特定的触发门槛、响应时间与可逆性稳定表现,其关键性能参数如表 1 所示。

开展多刺激协同响应设计的阶段,必须精准设置各响应基团的分布与浓度,防止产生耦合干扰,借助嵌段共聚、核壳结构和纳米限域组装可实现功能的区分,给予材料自修复、自适应与多模态记忆的功能特性,推进其在智能系统、柔性机器人、环境感知器件范畴的集成应用^[6-7]。

4 总结

新型高分子材料的研究进展体现了分子结构调控与多性能协同的深度融合趋势,合成技术持续优化,绿色与智能特性日益增强。多功能集成平台、响应型体系与生物基材料的快速发展,标志着材料科学正向高效、低碳与可持续方向演进。未来需深化机制理解,拓展结构构型,提升工程可实现性,为高性能应用奠定更坚实基础。

参考文献:

- [1] 尚建疆. 新型功能高分子材料的合成与性能表征 [J]. 化纤与纺织技术, 2025, 54(07): 45-47.
- [2] 张成一. 新型高温耐热高分子材料的研究与开发 [J]. 当代化工研究, 2023(22): 173-175.
- [3] 杨军, 谷元. 新型高分子材料的研发及应用进展 [J]. 大飞机, 2023(04): 24-29.
- [4] 阳志荣, 郑超, 唐舫成, 等. 基于新型高分子材料的加工成型技术应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(12): 150-152.
- [5] 佚名. 新型材料在多领域中的应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(04): 481.
- [6] 霍敏. 新型可持续性高分子材料的催化合成研究获进展 [J]. 化工新型材料, 2022, 50(04): 308-309.
- [7] 张文彬, 杨柳林, 董原辰, 等. 面向未来的智能材料物质科学 [J]. 中国科学基金, 2025, 39(03): 376-388.