

超支化聚合物的合成、结构特性及多元化应用研究进展

韩 甜, 汤 霞*, 李育桐, 王 晶

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年9月22日; 录用日期: 2026年10月15日; 发布日期: 2026年10月26日

摘 要

超支化聚合物是一类具有三维高度支化结构的高分子材料, 分子中含有大量支化点与末端官能团, 表现出低黏度、高溶解性和易端基功能化等特点, 在多个领域具有良好的应用前景。本文综述超支化聚合物的发展历程及研究进展, 对其结构特点与主要性能进行分析, 并介绍单体缩聚法、自缩合乙烯基聚合法、开环聚合法等主要合成方法的基本原理、特点及局限性; 重点梳理超支化聚合物在生物医学、涂料及水处理领域的应用研究进展。现有研究表明, 超支化聚合物仍存在部分合成工艺条件复杂、成本较高、机械性能不足及部分方法单体选择受限等问题。未来可围绕绿色低成本合成、结构与性能优化、新应用领域拓展及多组分复合体系构建等方向开展深入研究, 以进一步推动超支化聚合物的功能化发展与工业化应用。

关键词

超支化聚合物, 合成, 结构 - 性能, 应用

Research Progress on Synthesis, Structural Properties and Diversified Applications of Hyperbranched Polymers

Tian Han, Xia Tang*, Yutong Li, Jing Wang

School of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: September 22, 2026; accepted: October 15, 2026; published: October 26, 2026

*通讯作者。

文章引用: 韩甜, 汤霞, 李育桐, 王晶. 超支化聚合物的合成、结构特性及多元化应用研究进展[J]. 材料化学前沿, 2026, 14(4): 442-452. DOI: 10.12677/amc.2026.144041

Abstract

Hyperbranched polymers constitute a class of macromolecular materials characterized by three-dimensional, highly branched architectures, incorporating numerous branching points and terminal functional groups within their molecular structures. These materials exhibit low viscosity, high solubility, and facile end-group functionalization, demonstrating promising application prospects across multiple fields. This paper reviews the developmental history and research progress of hyperbranched polymers, analyzes their structural characteristics and principal properties, and presents the fundamental principles, features, and limitations of major synthetic methodologies, including monomer polycondensation, self-condensing vinyl polymerization, and ring-opening polymerization. Particular emphasis is placed on recent advances in the application of hyperbranched polymers in biomedical, coating, and water treatment domains. Existing studies indicate that hyperbranched polymers still face challenges such as complex synthesis process conditions, relatively high costs, insufficient mechanical properties, and restricted monomer selection in certain methods. Future research may be directed toward green and low-cost synthesis, structural and performance optimization, expansion into novel application fields, and construction of multi-component composite systems, thereby further advancing the functionalization and industrialization of hyperbranched polymers.

Keywords

Hyperbranched Polymers, Syntheses, Structure-Property, Application

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

超支化聚合物作为一类具有独特分子结构的高分子材料，其研究可追溯至 20 世纪中期。1952 年，Flory 提出由多官能团单体制备高度支化聚合物的理论可能性；20 世纪 80 年代中期，Kim 等成功合成相关聚合物后，该领域研究逐步兴起。

超支化聚合物具有高度支化的三维结构、纳米级尺寸、低黏度、高溶解性、高化学反应活性、内部空腔及大量末端官能团等特点，使其在涂料、生物医学和水处理等领域具有较高的研究与应用价值。

凭借独特拓扑结构和可调末端基团，超支化聚合物已用于结构材料、涂料、薄膜、催化、阻燃及发光材料等体系；其较好的功能化能力和生物相容性也使其在药物递送、成像及其他生物医学方向受到关注。随着合成技术发展，其研究已由结构设计逐步延伸至多领域应用。

2. 超支化聚合物的结构特点及性质

2.1. 超支化聚合物的结构特点

2.1.1. 高度支化结构

超支化聚合物是一类具有三维球状立体结构的高度无规多级支化聚合物，其结构与树枝状聚合物相似。该类聚合物以中心核为起点，由 AB_n 型支化单体逐级伸展，结构中包含树枝状单元、线性单元和末端基团三类重复单元(图 1) [1]。与树枝状大分子相比，其支化度较低、分子量具有多分散性，但合成简便、成本较低。

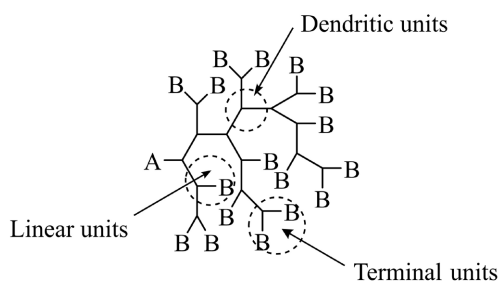


Figure 1. Schematic diagram of hyperbranched polymer structure
图 1. 超支化聚合物结构示意图

支化度 DB (degree of branching) 是表征超支化结构的关键参数, 可反映树枝状单元、线性单元和末端基团的组成。Hawker 等[2]提出其计算公式为:

$$DB = (D + T) / (D + I + T) \quad (1)$$

其中, D 、 T 、 I 分别表示树枝状单元、末端基团和线性单元所占比例。DB 受单体结构、加料方式、活性基团及合成路线等因素影响。

高度支化结构使分子链缠结和分子间作用减弱, 从而带来低黏度、良好流动性和较高溶解性; 同时, 紧凑拓扑与内部空腔为客体分子负载、界面调控和后续功能化提供了结构基础, 这些性质构成其区别于线性聚合物的重要特征。

2.1.2. 末端官能团丰富

超支化聚合物末端含有大量羟基、羧基、氨基、巯基等活性官能团, 其种类和数量取决于单体及聚合方法。

末端官能团一方面赋予聚合物较高的化学反应活性, 便于通过酯化、醚化、酰胺化等反应进行功能化改性。例如, 通过在超支化聚合物末端引入特定的官能团, 可赋予其良好的生物相容性, 使其适用于药物载体、组织工程等生物医学领域; 或者使其具备对特定金属离子的螯合能力, 应用于重金属离子吸附与分离等环境治理领域。另一方面可调节其溶解性、亲水/疏水性及界面性质, 例如, 含有较多羟基的超支化聚合物通常具有良好的亲水性, 而含有较多烷基链的末端官能团则会使超支化聚合物表现出一定疏水性, 这些性能差异使超支化聚合物能够满足不同应用场景下对材料性能的多样化需求。

2.2. 超支化聚合物的性质

受高度支化结构和丰富末端官能团影响, 超支化聚合物具有区别于线性聚合物的物理化学性质。

1) 低黏度性

其分子链缠结少、分子间作用较弱, 因此溶液黏度明显低于相近分子量的线性聚合物, 且黏度随分子量增加的幅度较小[3]。

2) 良好溶解性

高度支化结构与末端官能团共同降低分子间作用, 使其在多种有机溶剂及部分水性体系中具有良好溶解性, 便于溶液加工。

3) 独特的流变学性质

其溶液和熔体常表现出假塑性, 即黏度随剪切速率升高而降低, 有利于注塑、挤出等加工过程。

4) 相对较低的结晶度

支化结构阻碍分子链规整排列, 使其通常呈低结晶度或无定形态, 并可表现出较好的透明性和柔

韧性。

5) 容易成膜

近球状结构、低黏度、大量末端基团及内部“纳米空洞”使其易于成膜，并可通过端基交联形成具有选择性传质能力的膜材料。

6) 低表面张力

高度支化结构使分子链不易缠结，体系表面张力较低；通过末端官能团修饰，还可进一步调控表面性质。

7) 可控的玻璃化转变温度 T_g

玻璃化转变温度 T_g 对末端基团较敏感，可通过端基修饰进行调控，从而满足不同使用环境对热性能的要求。

超支化聚合物的应用性能并非由单一结构参数决定，而是支化度、末端官能团类型及分子量等因素共同作用的结果。较高的支化程度能够减少分子链缠结，并提供更多内部空腔和表面活性位点；末端官能团则直接影响材料的亲疏水性、化学反应活性及与客体分子的相互作用；分子量还会影响分子扩散、界面迁移及体系流变行为。因此，不同结构参数的协同调控是实现超支化聚合物应用性能优化的重要基础。其主要结构特征与典型应用性能之间的关联见表 1 (注：“↑”表示在本文所述研究范围内总体呈促进趋势，并不代表严格线性关系)。

Table 1. Correlation between the main structural characteristics of hyperbranched polymers and their key application performances

表 1. 超支化聚合物主要结构特征与关键应用性能的关联

结构参数	结构效应	主要性能影响
支化度	空腔及活性位点增加、链缠结减少	载药↑、吸附↑、传质↑
—NH ₂	质子化、配位、螯合	重金属吸附↑、破乳↑
—COOH	静电及化学结合	染料吸附↑
亲水端基	增强润湿及亲水性	膜渗透↑、油水分离↑
分子量	调节扩散及界面迁移	存在适宜范围
功能化复合	多结构协同	吸附↑、光催化性能↑

3. 超支化聚合物的合成方法

3.1. 缩聚法

缩聚法又称自缩聚法，是制备超支化聚合物的常用方法，通常以 AB_n 型单体为原料，通过 A、B 官能团之间的逐步反应进一步形成高度支化结构。为获得较高分子量，应提高 A、B 基团的反应选择性并抑制环化等副反应，典型过程如图 2 所示。

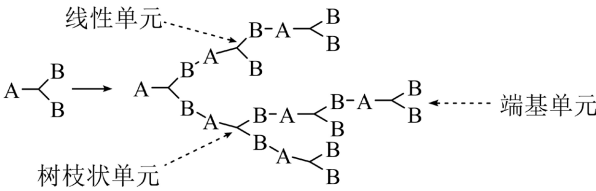


Figure 2. AB_2 monomer undergoes condensation polymerization to form a hyperbranched polymer
图 2. AB_2 单体缩聚成超支化聚合物

AB₂ 单体因制备较简便而应用最广, AB₃、AB₄ 和 AB₆ 等也可用于制备聚酯及聚硅氧烷。该法的主要问题是副反应和分子内环化可能引起凝胶化、环状低聚物生成及分子量难以提高。

3.2. 自缩合乙烯基聚合(SCVP)法

自缩合乙烯基聚合(SCVP)由 Fréchet 等[4]于 1995 年提出, 采用同时含乙烯基和潜在引发点的 AB_x 型单体。B 基团活化后形成引发中心并与乙烯基反应, 持续产生新的活性中心, 从而实现支化增长。该方法可扩展至阴离子、阳离子、自由基、原子转移和基团转移等多种乙烯基聚合体系。

与 AB_x 型单体缩聚相比, SCVP 单体制备较简单, 形成的 C-C 骨架稳定性较高, 并可通过共聚实现功能调控[5]。Liang 等[6]将 ATRP 与 SCVP 结合制备超支化聚合物-二氧化钛杂化纳米材料; 夏丽等[7]采用原子转移自由基聚合法制备多臂星型超支化嵌段共聚物复合材料。

3.3. 开环聚合

开环聚合法由 Suzuki 等[8]提出, 可在无需脱除小分子副产物的条件下获得高分子量超支化聚合物, 具有较好的原子经济性, 但反应步骤、技术要求和成本相对较高[9]。

该方法已用于制备超支化聚胺、聚酯和聚醚等多种聚合物。Parzuchowski 等[10]通过开环共聚制得含伯胺基团的超支化聚缩水甘油; 刘辉等[11]采用丙交酯开环聚合法制备黏均分子量为 5.1×10^5 的聚乳酸。

3.4. 其他合成方法

除上述方法外, 点击化学法、耦合单体法、辐照聚合法和主客体相互作用法也用于超支化聚合物制备。点击化学反应具有反应快、产率高等特点[12], 其中铜催化叠氮-炔基环加成应用较广[13]。Jiang 等[14]利用点击化学制得可用于非病毒基因传递的超支化 PEI-SS-HP, 该产物可将质粒 DNA 与带正电的纳米颗粒结合, 以还原二硫键。它具有低细胞毒性和高转染活性, 是一种优良的基因载体; 孙宁等[15]通过耦合单体法制备多代超支化水性聚氨酯, 其玻璃化转变温度随着产物代数的增加而升高。

辐照聚合法通过高能辐射产生离子或自由基活性中心引发聚合, 贾慧灵等[16]在微波辐射条件下制得单分散交联 PMMA 微球。主客体相互作用法则利用特异性识别和非共价作用构筑目标结构, 常见主体包括环糊精等, 客体可为 PEG、金刚烷、偶氮苯等[17]。

4. 超支化聚合物的应用

4.1. 在生物医学的应用

超支化聚合物可通过末端基团修饰及共价或非共价作用负载客体分子, 从而获得具有生物相容性、生物降解性和刺激响应性的功能材料[18], 在治疗、诊断、基因转染和组织工程等方面具有应用潜力。

4.1.1. 在治疗和诊断方面的应用

HBP 可与药物形成稳定复合物并实现递送, 是潜在的药物载体[19]。通过定制 HBP 的结构与末端官能团, 可使其发挥特定的治疗和诊断功能。Adeli 等[20]报道的超支化聚酯可用于顺铂递送; Xie 等[21]制备的超支化聚乳酸类材料可用于促进肌肉组织相关功能修复。

4.1.2. 在转染中的应用

基因转染是指通过生物化学或物理方法将目的基因插入到靶受体细胞中, 利用该基因片段的表达产物实现基因水平疾病治疗的技术。

传统病毒介导的基因转染存在潜在安全性问题[22], 因此非病毒载体受到关注。Selianitis 等[23]采用 RAFT 技术制备 POEGMA-co-PDIPAEMA, 并与 DNA 形成 pH/温度双响应纳米复合物, 在血清环境中在

血清环境中保持稳定,并在体外细胞实验中表现出较低细胞毒性。

4.1.3. 在组织工程学应用

HBP 因其特殊的拓扑结构,在组织工程领域得到广泛应用,主要用作组织工程支架,为细胞生长提供支撑。且 HBP 可形成高交联材料,有效解决支架过度溶胀的问题,同时促进细胞的黏附和增殖。Hatamzadeh 等[24]将超支化聚吡咯(HAPGnPPy)与聚己内酯(PCL)复合后通过电纺丝制备纤维支架,兼具电活性、生物降解性,可支持 HepG2 细胞黏附和增殖。

4.2. 在涂料中的应用

HBP 具有低链缠结、低黏度和多末端官能团等特点,可作为成膜树脂或改性组分用于多种涂料体系。

4.2.1. UV 固化涂料

UV 固化体系通常需要控制黏度并减少反应性稀释剂或有机溶剂用量。超支化聚合物兼具低黏度和高活性,因而成为 UV 固化涂料的重要研究方向[25]。

Sabani 等[26]以超支化聚酯多元醇制备聚氨酯丙烯酸酯,应用于木材基材后提高了 UV 固化涂层的附着力和光泽度。Ireni 等[27]采用 A3 + B3 缩聚路线制得含硫超支化涂层,从结果来看,涂层在 400~800 nm 波段透光率表现良好,折射率约为 1.6012~1.5447,涂层的 Tafel 图表明,耐蚀性相当突出,腐蚀速率仅为 1.63×10^{-5} mm/a。

4.2.2. 水性涂料

水性超支化聚合物因链缠结少、端基活性高,可在较低亲水基团含量下实现水分散,并兼顾高固含、低黏度和较低 VOC 排放。

Singh 等[28]制备水溶性羟基超支化聚酯,并与六甲氧基甲基三聚氰胺树脂配合使用;当两者摩尔比为 1:5 时,涂层表现出较好的力学和防腐性能。Ma 等[29]制备的水溶性超支化聚酯在固含量超过 60%时,半年内未出现分层,具有较好储存稳定性,与氨基树脂按质量比 2.5:1 混合并在 130℃~135℃固化后,涂层具有较好的耐盐雾性和机械性能。

4.2.3. 在防腐涂料中的应用

在防腐涂料中,超支化聚合物的孔隙结构和末端官能团有利于纳米填料负载、接枝和稳定分散,从而获得高固含、低黏度并具有较好耐久性的复合涂层。Selim 等[30]以向日葵油基超支化醇酸树脂/ZnO 构建纳米复合涂层,添加量为 0.5%的 ZnO 即可较均匀分散并改善耐久和防腐性能;Rahman 等[31]将 Fe_3O_4 纳米颗粒引入超支化醇酸体系,采用 ASTM 方法评估得到涂层具有良好柔韧性、物理力学和耐腐蚀性能,电化学测试阻抗可达 $1 \times 10^7 \Omega$,腐蚀速率为 1.0×10^{-4} mpy。

4.2.4. 在防污涂料中的应用

防污方面,表面污垢及生物黏附是海洋、医疗和工业界面的常见问题[32],超支化聚合物可通过高度支化或交联结构调控纳米尺度表面性质,表现出防污和污垢释放能力[33]。Ai 等[34]制备可裂解 UV 固化超支化聚合物涂层,本研究进一步对该类超支化聚合物开展多项性能测试,主要围绕蛋白抗性、抗菌附着以及抗硅藻活性这几个维度展开评估。实验测试结果显示,引入二甘醇单元的聚合物样品表现出十分突出的防污效果,对蛋白质、海洋细菌和硅藻黏附均表现出较好的抑制作用。

4.3. 在水处理中的应用

4.3.1. 在重金属废水处理中的应用

超支化聚合物具有高支化度、纳米尺度、多孔结构及多端基,可用于重金属吸附和材料接枝改性[35]。

重金属离子通常难以生物降解[36],其去除主要依赖末端官能团与金属离子的络合、螯合或静电作用[37]。

与磁性材料复合可兼顾吸附与分离。Harinath 等[38]制备的超支化聚合物包覆磁性吸附剂可去除 Cd^{2+} 、 Co^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 等重金属离子,并可在约 5 min 达到吸附平衡且具有再生能力;含氨基体系在酸性条件下可通过质子化基团参与离子交换,在中性或碱性条件下则可通过氨基与金属离子螯合增强结合[39]。

超支化聚合物还可与淀粉、纤维素等生物基材料交联[40]。Abdellatif 等[41]研究了不同浓度 PAMAM 交联前后 i-卡拉胶气凝胶表面形貌的变化。图 3 [41]显示,所有的 i-卡拉胶气凝胶都具有大孔结构,有利于金属离子吸附。

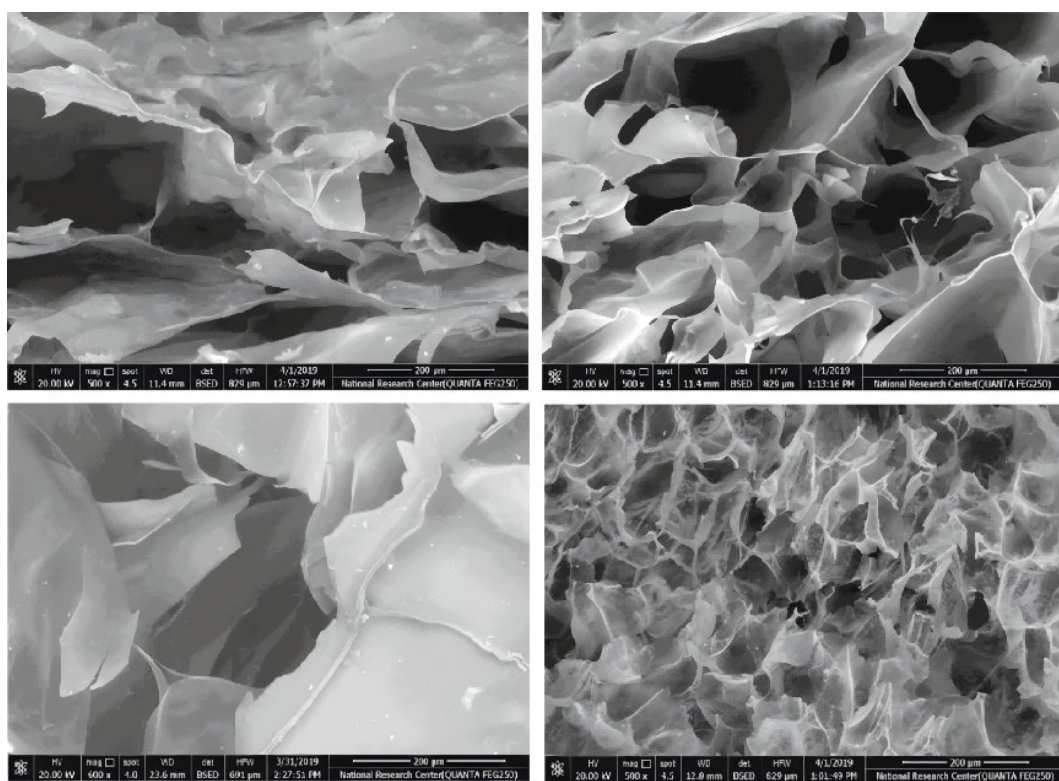


Figure 3. SEM images of cross-linked super-branched polyamide and carrageenan at different concentrations
图 3. 不同浓度的超支化聚酰胺与卡拉胶交联后的 SEM 图像

4.3.2. 在染料废水处理中的应用

在染料废水处理中,高度支化结构可提供多孔吸附空间,末端基团则通过静电作用、离子络合和化学键合增强染料结合[42]-[44]。以超支化聚甘油多羧基磁凝胶为例,其端羧基可与阳离子染料分子的氨基基团间发生强化学键作用,染料分子被吸附在特定的均相结合位点后,可在超支化磁凝胶表面形成覆膜层,达到吸附平衡。

超支化聚合物在多次吸附/解吸循环后仍可保持孔隙和网状结构,为染料分子持续提供吸附位点,表现出较好的循环再生能力[45]-[47]。凭借自身高度支化的空间结构及外端活性基团,超支化聚合物对染料的吸附容量大、吸附再生性强,在染料废水处理中具有广泛的应用前景。

4.3.3. 在含油废水处理中的应用

含油废水处理的核心是实现高效油水分离,传统重力分离、气浮、凝聚等方法存在效率、能耗或操

作方面的局限。超支化聚合物凭借高度支化结构和界面活性, 可作为破乳剂或乳化调控材料作用于油水界面[48]。

Cao 等[49]采用超支化聚乙烯亚胺改性玻璃纤维膜, 对油水乳液表现出良好的润湿、渗透和分离性能, 相关排油率可达 99.7%, 并在一定温度和化学介质条件下保持分离性能。Zhang 等[50]制备端氨基超支化聚酰胺-胺破乳剂, 以 1,3-丙二胺为核的体系在投加量低于 40 mg/L 时, 可在 30 min 内实现约 92% 的油分离率。

4.3.4. 在其他废水处理中的应用

此外, 超支化聚合物还可用于钻井废水、医药废水及放射性污染物处理。王学川等[51]制备的超支化絮凝剂兼具电中和和吸附架桥作用; 超支化聚乙烯亚胺/钨酸铋光催化膜可促进三氯生降解, 降解效率可达 86% [52]; 与 Fe_3O_4 复合后还可用于海水中 U(VI) 吸附, 吸附率可达 90% [53]。

总体而言, 超支化聚合物依靠空腔结构和表面活性基团, 可通过吸附、络合、界面调控及膜分离等机制实现多类污染物去除, 且具有易接枝、易修饰等优势[54]。

5. 总结与展望

5.1. 研究成果总结

本综述围绕超支化聚合物的结构、性质、合成与应用进行了梳理。该类聚合物具有高度支化、类球形紧凑结构及丰富末端官能团, 由此形成低黏度、良好溶解性、可调界面和端基性能等特征。

性能方面, 超支化聚合物的溶解性、黏度、玻璃化转变温度和界面行为均与支化程度及端基类型密切相关; 其机械性能等不足可通过分子设计和复合改性进一步改善。

制备方法主要包括 ABn 型单体缩聚、自缩合乙烯基聚合和开环聚合, 并可辅以点击化学、耦合、辐照及主客体作用等路线。不同方法在原料适用性、分子量控制、反应步骤和成本方面各有特点。

应用方面, 超支化聚合物已在生物医学、涂料和水处理等领域形成较系统的研究基础, 其性能优势主要来自高度支化拓扑、内部空腔和可功能化末端基团, 并可进一步延伸至塑料加工、轻工及其他功能材料体系。

5.2. 未来研究方向展望

尽管相关研究已取得较大进展, 超支化聚合物在规模化制备、性能协同与应用稳定性方面仍有进一步提升空间。

合成方法方面, 现有技术虽已形成多条路线, 但部分体系仍存在反应条件较苛刻、步骤较多、成本偏高及结构可控性不足等问题。未来可进一步开发高效、绿色、低成本的催化与聚合体系, 通过降低反应温度和压力、提高反应选择性、减少副反应和简化工艺来提升产物质量与收率; 同时开发新的单体和聚合体系, 拓展超支化聚合物的结构类型及功能范围。

性能提升方面, 高度支化结构带来低黏度和易功能化等优势, 但部分材料的机械性能、热稳定性或长期服役稳定性仍需改善。可通过引入刚性结构单元、调控分子链刚柔比例和分子间相互作用提高力学性能, 并利用末端官能团的精确修饰调节溶解性、界面特性以及光学、电学和刺激响应性能, 使材料更好适配复杂应用环境。

应用拓展方面, 除现有生物医学、涂料和水处理领域外, 超支化聚合物还可向能源与智能材料方向延伸。例如, 可作为电极材料、电解质或功能添加剂参与锂离子电池和超级电容器体系, 也可利用其多孔结构、可修饰性和刺激响应性开发分离膜、环境吸附材料以及具有形状记忆、自修复和传感功能的智能材料。

此外,与纳米材料、生物材料和金属材料构建复合体系,是实现性能协同的重要方向。通过与碳纳米管、石墨烯等复合可改善导电和力学性能,与生物材料复合可进一步拓展组织工程和药物输送应用,与金属或无机颗粒复合则有望提高耐腐蚀、耐磨及界面性能。围绕合成绿色化、结构精准化、性能协同化和应用工程化持续推进,有望推动其规模化应用。

参考文献

- [1] 张小平,黄艳琴,任厚基,等.超支化聚合物研究最新进展[J].科学通报,2011,56(21):1683-1695.
- [2] Hawker, C.J., Lee, R. and Frechet, J.M.J. (1991) One-Step Synthesis of Hyperbranched Dendritic Polyesters. *Journal of the American Chemical Society*, **113**, 4583-4588. <https://doi.org/10.1021/ja00012a030>
- [3] 吕玲洁,王国伟,庄玲华,等.超支化聚合物在皮革领域的应用研究进展[J].皮革科学与工程,2012,22(5):32-36.
- [4] Fréchet, J.M.J., Henmi, M., Gitsov, I., Aoshima, S., Leduc, M.R. and Grubbs, R.B. (1995) Self-Condensing Vinyl Polymerization: An Approach to Dendritic Materials. *Science*, **269**, 1080-1083. <https://doi.org/10.1126/science.269.5227.1080>
- [5] 王碧云.自缩合乙烯基聚合法合成超支化聚合物[J].科技创新与应用,2017(9):56.
- [6] Liang, H., Li, X., Xiong, L. and Huang, S. (2013) Synthesis and Characterization of Titania Nanoparticles Functionalized with Hyperbranched Polymer via Self-Condensing Vinyl Polymerization. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, **43**, 1034-1039. <https://doi.org/10.1080/15533174.2012.753624>
- [7] 夏丽,周志平.SiO₂多臂星型超支化嵌段共聚物复合材料的制备与表征[J].功能材料,2014,45(2):90-94.
- [8] Suzuki, M., Ii, A. and Saegusa, T. (1992) Multibranching Polymerization: Palladium-Catalyzed Ring-Opening Polymerization of Cyclic Carbamate to Produce Hyperbranched Dendritic Polyamine. *Macromolecules*, **25**, 7071-7072. <https://doi.org/10.1021/ma00051a055>
- [9] Coady, D.J., Engler, A.C., Horn, H.W., Bajjuri, K.M., Fukushima, K., Jones, G.O., et al. (2012) Catalyst Chelation Effects in Organocatalyzed Ring-Opening Polymerization of Lactide. *ACS Macro Letters*, **1**, 19-22. <https://doi.org/10.1021/mz2000048>
- [10] Parzuchowski, P.G., Stefańska, M., Świdarska, A., Roguszczyńska, M. and Zybert, M. (2018) Hyperbranched Polyglycerols Containing Amine Groups — Synthesis, Characterization and Carbon Dioxide Capture. *Journal of CO₂ Utilization*, **27**, 145-160. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.07.010>
- [11] 刘辉,王肖杰,张留学.丙交酯开环聚合法合成高分子量聚乳酸[J].广州化工,2015,43(16):123-126.
- [12] 田军,张博晓,肖利吉,等.超支化聚合物合成的研究进展[J].粘接,2016,37(10):61-67.
- [13] Kantheti, S., Narayan, R. and Raju, K.V.S.N. (2013) Development of Moisture Cure Polyurethane-Urea Coatings Using 1,2,3-Triazole Core Hyperbranched Polyesters. *Journal of Coatings Technology and Research*, **10**, 609-619. <https://doi.org/10.1007/s11998-013-9494-2>
- [14] Jiang, X., Liu, J., Xu, L. and Zhuo, R. (2011) Disulfide-Containing Hyperbranched Polyethylenimine Derivatives via Click Chemistry for Nonviral Gene Delivery. *Macromolecular Chemistry and Physics*, **212**, 64-71. <https://doi.org/10.1002/macp.201000448>
- [15] 孙宁,李远,徐朝华,等.脂肪族多代超支化水性聚氨酯的制备与表征[J].化工新型材料,2013,41(6):81-83.
- [16] 贾慧灵,郭峰,吴锦绣,等.微波辐射无皂乳液聚合法制备单分散交联 PMMA 微球及其性能研究[J].塑料工业,2024,52(6):43-48.
- [17] 史学涛,霍涟漪,陈思名.超支化聚合物的制备方法研究现状及发展趋势[J].应用化工,2021,50(11):3115-3118.
- [18] Martinez-Garcia, M., Kormpa, A. and van der Maarel, M.J.E.C. (2017) The Glycogen of Galdieria Sulphuraria as Alternative to Starch for the Production of Slowly Digestible and Resistant Glucose Polymers. *Carbohydrate Polymers*, **169**, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.04.004>
- [19] Wang, D., Chen, H., Su, Y., Qiu, F., Zhu, L., Huan, X., et al. (2013) Supramolecular Amphiphilic Multiarm Hyperbranched Copolymer: Synthesis, Self-Assembly and Drug Delivery Applications. *Polymer Chemistry*, **4**, 85-94. <https://doi.org/10.1039/c2py20573d>
- [20] Adeli, M., Rasouljan, B., Saadatmehr, F. and Zabihi, F. (2013) Hyperbranched Poly(Citric Acid) and Its Application as Anticancer Drug Delivery System. *Journal of Applied Polymer Science*, **129**, 3665-3671. <https://doi.org/10.1002/app.39028>
- [21] Xie, M., Wang, L., Guo, B., Wang, Z., Chen, Y.E. and Ma, P.X. (2015) Ductile Electroactive Biodegradable Hyperbranched Polylactide Copolymers Enhancing Myoblast Differentiation. *Biomaterials*, **71**, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.08.042>

- [22] Rodrigues, P.R., Wang, X., Li, Z., Lyu, J., Wang, W. and Vieira, R.P. (2023) A New Nano Hyperbranched β -Pinene Polymer: Controlled Synthesis and Nonviral Gene Delivery. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **222**, Article ID: 113032. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.113032>
- [23] Selianitis, D., Katifelis, H., Gazouli, M. and Pispas, S. (2023) Novel Multi-Responsive Hyperbranched Polyelectrolyte Polyplexes as Potential Gene Delivery Vectors. *Pharmaceutics*, **15**, Article 1627. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15061627>
- [24] Hatamzadeh, M., Sarvari, R., Massoumi, B., Agbolaghi, S. and Samadian, F. (2020) Liver Tissue Engineering via Hyperbranched Polypyrrole Scaffolds. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, **69**, 1112-1122. <https://doi.org/10.1080/00914037.2019.1667800>
- [25] 梁晟源, 蒙业云, 陈力, 等. 超支化聚合物在涂料领域应用的研究进展[J]. 上海涂料, 2022, 60(5): 35-41.
- [26] Şabani, S., Önen, A.H. and Güngör, A. (2012) Preparation of Hyperbranched Polyester Polyol-Based Urethane Acrylates and Applications on UV-Curable Wood Coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, **9**, 703-716. <https://doi.org/10.1007/s11998-012-9418-6>
- [27] Ireni, N.G., Narayan, R., Basak, P. and Raju, K.V.S.N. (2016) Poly(Thiourethane-Urethane)-Urea as Anticorrosion Coatings with Impressive Optical Properties. *Polymer*, **97**, 370-379. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.04.072>
- [28] Singh, A.P., Suryanarayana, C., Balaji Naik, R. and Gunasekaran, G. (2016) Development of Hyperbranched Polyester Polyol-Based Waterborne Anticorrosive Coating. *Journal of Coatings Technology and Research*, **13**, 41-51. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9720-1>
- [29] Ma, S., Qian, J., Zhuang, Q., Li, X., Kou, W. and Peng, S. (2018) Synthesis and Application of Water-Soluble Hyperbranched Polyester Modified by Trimellitic Anhydride. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, **55**, 414-421. <https://doi.org/10.1080/10601325.2018.1453261>
- [30] Selim, M.S., Shenashen, M.A., Elmarakbi, A., EL-Saeed, A.M., Selim, M.M. and El-Safty, S.A. (2017) Sunflower Oil-Based Hyperbranched Alkyd/Spherical ZnO Nanocomposite Modeling for Mechanical and Anticorrosive Applications. *RSC Advances*, **7**, 21796-21808. <https://doi.org/10.1039/c7ra01343d>
- [31] Rahman, O.U., Bhat, S.I., Yu, H. and Ahmad, S. (2017) Hyperbranched Soya Alkyd Nanocomposite: A Sustainable Feedstock-Based Anticorrosive Nanocomposite Coatings. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **5**, 9725-9734. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01513>
- [32] Magin, C.M., Cooper, S.P. and Brennan, A.B. (2010) Non-Toxic Antifouling Strategies. *Materials Today*, **13**, 36-44. [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(10\)70058-4](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(10)70058-4)
- [33] Calabrese, D., Wenning, B. and Ober, C.K. (2015) Block Copolymers as Antifouling and Fouling Resistant Coatings. In: Hadjichristidis, N. and Hirao, A., Eds., *Anionic Polymerization*, Springer, 881-924. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54186-8_20
- [34] Ai, X., Pan, J., Xie, Q., Ma, C. and Zhang, G. (2021) UV-Curable Hyperbranched Poly(Ester-co-Vinyl) by Radical Ring-Opening Copolymerization for Antifouling Coatings. *Polymer Chemistry*, **12**, 4524-4531. <https://doi.org/10.1039/d1py00810b>
- [35] 李武松, 刘聪聪, 毕研刚, 等. 超支化聚合物在环氧改性中的应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(4): 174-181.
- [36] 杨丽娟, 王刚, 张航, 等. 响应面法优化重金属絮凝剂 MAMPAM 除 Cu(II) 的絮凝条件[J]. 环境科学研究, 2022, 35(3): 789-795.
- [37] Asaad, J.N., Ikladios, N.E., Awad, F. and Müller, T. (2013) Evaluation of Some New Hyperbranched Polyesters as Binding Agents for Heavy Metals. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **91**, 257-263. <https://doi.org/10.1002/cjce.21634>
- [38] Harinath, Y., Reddy, D.H.K., Sharma, L.S. and Sessaiah, K. (2017) Development of Hyperbranched Polymer Encapsulated Magnetic Adsorbent ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2\text{-NH}_2\text{-PAA}$) and Its Application for Decontamination of Heavy Metal Ions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **5**, 4994-5001. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.031>
- [39] Kainz, Q.M. and Reiser, O. (2014) Polymer- and Dendrimer-Coated Magnetic Nanoparticles as Versatile Supports for Catalysts, Scavengers, and Reagents. *Accounts of Chemical Research*, **47**, 667-677. <https://doi.org/10.1021/ar400236y>
- [40] Tkalec, G., Knez, Ž. and Novak, Z. (2015) Formation of Polysaccharide Aerogels in Ethanol. *RSC Advances*, **5**, 77362-77371. <https://doi.org/10.1039/c5ra14140k>
- [41] Abdellatif, F.H.H. and Abdellatif, M.M. (2020) Bio-Based I-Carrageenan Aerogels as Efficient Adsorbents for Heavy Metal Ions and Acid Dye from Aqueous Solution. *Cellulose*, **27**, 441-453. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02818-x>
- [42] Song, Y., Duan, Y. and Zhou, L. (2018) Multi-Carboxylic Magnetic Gel from Hyperbranched Polyglycerol Formed by Thiol-Ene Photopolymerization for Efficient and Selective Adsorption of Methylene Blue and Methyl Violet Dyes. *Journal of Colloid and Interface Science*, **529**, 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.06.005>

- [43] Song, W., Liu, Y., Qian, L., Niu, L., Xiao, L., Hou, Y., *et al.* (2016) Hyperbranched Polymeric Ionic Liquid with Imidazolium Backbones for Highly Efficient Removal of Anionic Dyes. *Chemical Engineering Journal*, **287**, 482-491. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.039>
- [44] Gao, H., Wang, Y. and Zheng, L. (2013) Hydroxyl-Functionalized Ionic Liquid-Based Cross-Linked Polymer as Highly Efficient Adsorbent for Anionic Azo Dyes Removal. *Chemical Engineering Journal*, **234**, 372-379. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.08.078>
- [45] Zhu, C., Xia, Y., Zai, Y., Dai, Y., Liu, X., Bian, J., *et al.* (2019) Adsorption and Desorption Behaviors of HPEI and Thermoresponsive HPEI Based Gels on Anionic and Cationic Dyes. *Chemical Engineering Journal*, **369**, 863-873. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.169>
- [46] Chen, Z., Zhou, L., Zhang, F., Yu, C. and Wei, Z. (2012) Multicarboxylic Hyperbranched Polyglycerol Modified SBA-15 for the Adsorption of Cationic Dyes and Copper Ions from Aqueous Media. *Applied Surface Science*, **258**, 5291-5298. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.02.021>
- [47] Fan, Y., Liu, H., Zhang, Y. and Chen, Y. (2015) Adsorption of Anionic MO or Cationic MB from MO/MB Mixture Using Polyacrylonitrile Fiber Hydrothermally Treated with Hyperbranched Polyethylenimine. *Journal of Hazardous Materials*, **283**, 321-328. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.042>
- [48] Zhang, L., Ying, H., Yan, S., Zhan, N., Guo, Y. and Fang, W. (2018) Hyperbranched Poly(Amido Amine) as an Effective Demulsifier for Oil-in-Water Emulsions of Microdroplets. *Fuel*, **211**, 197-205. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.066>
- [49] Cao, Z., Hao, T., Wang, P., Zhang, Y., Cheng, B., Yuan, T., *et al.* (2017) Surface Modified Glass Fiber Membranes with Superior Chemical and Thermal Resistance for O/W Separation. *Chemical Engineering Journal*, **309**, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.013>
- [50] Zhang, L., Ying, H., Yan, S., Zhan, N., Guo, Y. and Fang, W. (2018) Hyperbranched Poly(Amido Amine) Demulsifiers with Ethylenediamine/1,3-Propanediamine as an Initiator for Oil-in-Water Emulsions with Microdroplets. *Fuel*, **226**, 381-388. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.196>
- [51] 王学川, 胡艳鑫, 郑书杰, 等, 超支化聚合物絮凝剂的合成与表征[J]. 精细石油化工, 2011, 28(3): 36-40.
- [52] Shaku, K.M., Dlamini, L.N. and Malinga, S.P. (2020) Highly Efficient Photocatalytic Hyperbranched Polyethyleneimine/Bismuth Vanadate Membranes for the Degradation of Triclosan. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **17**, 3297-3312. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02699-9>
- [53] Li, W., Liu, Q., Chen, R., Yu, J., Zhang, H., Liu, J., *et al.* (2018) Efficient Removal of U(VI) from Simulated Seawater with Hyperbranched Polyethylenimine (HPEI) Covalently Modified SiO₂ Coated Magnetic Microspheres. *Inorganic Chemistry Frontiers*, **5**, 1321-1328. <https://doi.org/10.1039/c8qi00198g>
- [54] Li, S., Lin, Q., Zhu, H., Hou, H., Li, Y., Wu, Q., *et al.* (2016) Improved Mechanical Properties of Epoxy-Based Composites with Hyperbranched Polymer Grafting Glass-Fiber. *Polymers for Advanced Technologies*, **27**, 898-904. <https://doi.org/10.1002/pat.3746>