

预聚体法优化水性聚氨酯树脂合成效率与产品稳定性的研究

闫爱平

浙江中科亨利新材料有限公司 浙江 丽水 323000

【摘要】：水性聚氨酯树脂因具备良好的环保性能、力学性能及广泛的应用前景，在涂料、胶粘剂、皮革涂饰剂等领域备受关注。预聚体法作为合成水性聚氨酯树脂的常用方法，其合成效率与产品稳定性直接影响水性聚氨酯树脂的工业化生产与实际应用效果。本文围绕预聚体法优化水性聚氨酯树脂合成效率与产品稳定性展开研究，首先阐述了预聚体法合成水性聚氨酯树脂的基本原理与特点，接着从原料选择、反应条件控制等方面深入分析了影响合成效率和产品稳定性的关键因素，进而探讨了通过预聚体法优化提升合成效率与产品稳定性的相关理论机制，最后总结了预聚体法在水性聚氨酯树脂合成中的优势及未来发展方向，旨在为水性聚氨酯树脂的高效、稳定合成提供理论参考，推动其在更多领域的进一步应用。

【关键词】：预聚体法；水性聚氨酯树脂；合成效率；产品稳定性；原料选择；反应条件

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.070

1 引言

随着环保意识的不断增强以及相关环保法规的日益严格，传统溶剂型聚氨酯树脂因含有大量挥发性有机化合物，对环境对人体健康存在潜在危害，其应用受到了一定限制。在此背景下，水性聚氨酯树脂凭借以水为分散介质、无挥发性有机化合物排放或排放量极低等优势，逐渐成为聚氨酯领域的研究热点和发展方向。预聚体法作为合成水性聚氨酯树脂的重要方法之一，具有反应过程相对易于控制、产品性能可调范围广等特点，在工业生产中得到了较为广泛的应用。然而，在实际合成过程中，预聚体法仍面临着合成效率不高、产品稳定性欠佳等问题，这些问题不仅增加了生产成本，还制约了水性聚氨酯树脂产品质量的提升和应用范围的拓展。因此，深入研究预聚体法合成水性聚氨酯树脂的相关理论，优化合成过程以提高合成效率和产品稳定性，具有重要的理论意义和实际应用价值。本文将从预聚体法合成水性聚氨酯树脂的基本原理出发，分析影响合成效率与产品稳定性的关键因素，探讨优化策略，为水性聚氨酯树脂的工业化生产提供理论支持。

2 预聚体法合成水性聚氨酯树脂的基本原理

预聚体法合成水性聚氨酯树脂主要分为预聚体制备与水性化两个阶段。在预聚体制备阶段，多异氰酸酯与低聚物多元醇在特定条件下反应，生成含一定异氰酸酯基团的预聚体。多异氰酸酯含两个及以上异氰酸酯基团，会与低聚物多元醇中的羟基发生加成反应形成氨基甲酸酯键，随反应推进分子链不断增长，最终形成具有特定分子量、分子量分布及异氰酸酯基团含量的预聚体。此阶段是后续水性化的基础，预聚体的结构、分子量相关参数及异氰酸酯基团含量，对后续水性化过程和最终产品性能均有重要影响。

在预聚体水性化阶段，先向预聚体中加入亲水性扩链剂，在分子链上引入羧基、磺酸基等亲水性基团，改变预聚体表面性质以具备水中分散能力；随后在高速搅拌下加去离子水，预

聚体借助亲水性基团分散形成稳定水性聚氨酯分散体。此过程中，亲水性扩链剂还能与预聚体中的异氰酸酯基团反应，使分子链继续增长，调控产品分子量与交联程度，进而影响力学性能、耐水性等指标。此外，可按需加中和剂，中和羧基等酸性基团形成盐键，进一步提升预聚体在水中的分散性与稳定性，保障最终分散体的储存稳定性和使用性能。

3 影响预聚体法合成水性聚氨酯树脂合成效率的关键因素

3.1 原料选择

原料选择是影响预聚体法合成水性聚氨酯树脂效率的首要因素，其反应活性与结构特征直接决定反应速率和进程。多异氰酸酯方面，常见的甲苯二异氰酸酯（TDI）、二苯基甲烷二异氰酸酯（MDI）、六亚甲基二异氰酸酯（HDI）中，TDI反应活性较高，与低聚物多元醇反应能快速生成预聚体，缩短制备时间；HDI虽耐黄变性能好，但因不含苯环反应活性低，相同条件下生成预聚体耗时更长，故追求高效时需优先选高活性种类，同时兼顾产品性能。低聚物多元醇的种类和分子量也有影响，聚酯多元醇含醚键，羟基反应活性高，与多异氰酸酯反应快，利于提升预聚体制备效率；聚醚多元醇含酯键，强度和耐磨性好，但羟基反应活性低，会延长制备时间。且分子量小的低聚物多元醇羟基含量高、反应位点多，反应速率快，分子量大的则因链长、羟基含量低导致反应慢。亲水性扩链剂的种类和用量同样关键，二羟甲基丙酸（DMPA）反应活性高，能快速与预聚体中异氰酸酯基团反应引入羧基，缩短水性化阶段时间；二羟甲基丁酸（DMBA）反应活性低，会增加水性化耗时。用量过少会因亲水性基团不足导致预聚体难分散，降低效率；用量过多则增加成本且影响产品耐水性，因此需合理选择其种类与用量。

3.2 反应条件控制

反应条件对预聚体法合成水性聚氨酯树脂效率影响显著，

其中反应温度在预聚体制备阶段尤为关键，温度过低会降低多异氰酸酯与低聚物多元醇的反应活性，减慢反应速率并延长预聚体生成时间，温度过高虽能提速，却易引发多异氰酸酯自聚、氨基甲酸酯键分解等副反应，消耗原料、降低预聚体产质还可能生成凝胶影响后续水性化，故需控制在 60-90℃ 并依原料与反应体系调整；反应时间同样重要，预聚体制备时时间过短会因反应不完全导致预聚体异氰酸酯基团含量不达标，影响后续流程与产品性能且需补时反而低效，时间过长则增加生产周期与成本，还可能使预聚体分子量过大甚至凝胶阻碍水性化分散，通常需监测异氰酸酯基团含量达标即停止反应；搅拌速率的影响也不可忽视，预聚体制备阶段适当提速能让反应物充分混合、增加分子接触以加快反应、缩短时间，速率过低会导致混合不均，出现局部反应剧烈凝胶而其他区域反应不完全的情况，水性化阶段高速搅拌可使预聚体在水中均匀分散形成稳定分散体，速率过低则易形成大颗粒或团聚体需额外调整，因此需按反应阶段选择合适搅拌速率。

4 影响预聚体法合成水性聚氨酯树脂产品稳定性的关键因素

4.1 预聚体结构

预聚体结构是影响水性聚氨酯树脂产品稳定性的根本因素，其分子量大小及分布、异氰酸酯基团含量、亲水性基团含量及分布等结构参数均起关键作用。分子量方面，过小会使预聚体在水中分散形成的粒子稳定性差、易团聚致分散体分层，过大则因分子链作用力强难以分散、易成凝胶，分布过宽还会造成分散体粒子大小不均，小粒子易聚集、大粒子易沉降，故需将其控制在合适范围。异氰酸酯基团含量也很关键，过高会在水性化阶段与水反应生成大量氨基，氨基进一步反应导致分子链交联过度、形成凝胶，过低则无法与亲水性扩链剂充分反应，使预聚体亲水性基团不足、分散性差，易出现分层或沉淀，因此需精确控制该含量以满足反应需求并保障稳定性。亲水性基团方面，含量过低会让预聚体亲水性不足、难以分散，过高虽能提升分散性却会降低产品耐水性且增加成本；分布不均时，亲水性基团少的分子链分散性差、易团聚，所以制备中需控制亲水性扩链剂用量与反应条件，确保基团均匀分布且含量适宜。

4.2 水性化过程参数

水性化过程中的关键参数对水性聚氨酯树脂产品稳定性影响显著。分散温度方面，过低会使预聚体粘度大、难充分分散，易形成大颗粒或团聚体；过高虽能降粘度助分散，却会加速预聚体与水反应，导致分子链过度交联形成凝胶，故需控制在 40-60℃，并依预聚体性质与反应体系调整。加水量也很关键，过少会使预聚体分散浓度高，粒子间距小易碰撞团聚，降低稳定性；过多虽能降浓度减团聚，却会增加后续干燥能耗与

成本，还会降低产品固体含量影响使用性能，需结合实际需求与预聚体性质确定用量，平衡稳定性与成本。中和剂的种类和用量同样重要，其作用是中和预聚体酸性基团形成盐键以提亲水性与分散性，三乙胺（TEA）中和能力强、挥发性高，形成的盐键稳定，利于提升分散体稳定性；二甲基乙醇胺（DMEA）中和能力弱、挥发性低，盐键稳定性较差，可能影响长期稳定性。用量过少无法充分中和酸性基团，预聚体亲水性不足致稳定性差；过多则残留中和剂影响产品耐水性与力学性能，还可能使 pH 值过高不利后续应用，需合理选择种类与用量。

5 预聚体法优化水性聚氨酯树脂合成效率与产品稳定性的策略

5.1 原料优化选择策略

在原料选择方面，为了提高合成效率并保证产品稳定性，需要根据具体的应用需求和反应特性，对多异氰酸酯、低聚物多元醇和亲水性扩链剂进行优化选择。对于多异氰酸酯，在追求较高合成效率时，可以优先选择反应活性较高的 TDI，但如果对产品的耐黄变性能有较高要求，则可以选择 HDI 或其他耐黄变多异氰酸酯，并通过适当提高反应温度或延长反应时间来弥补其反应活性较低的不足，以保证合成效率。同时，也可以考虑使用混合多异氰酸酯，将反应活性较高和性能较好的多异氰酸酯按一定比例混合使用，在提高合成效率的同时，兼顾产品的综合性能。

5.2 反应条件优化策略

在反应条件控制方面，针对预聚体制备阶段和水性化阶段的不同需求，需分别进行精细化优化，以实现合成效率提升与产品稳定性保障的双重目标。对于预聚体制备阶段的反应温度，应根据所选用多异氰酸酯和低聚物多元醇的反应活性进行动态调整。例如，当使用反应活性较高的 TDI 与聚醚多元醇组合时，可将反应温度控制在 65-75℃，既能保证较快的反应速率，又能有效抑制副反应；若采用反应活性较低的 HDI 与聚酯多元醇组合，则可适当将温度提高至 80-90℃，通过温度补偿提升反应效率，同时需缩短高温下的反应时长，避免预聚体过度交联。

5.3 水性化过程优化策略

水性化过程优化需围绕分散温度、加水量和中和工艺构建协同体系。分散温度可采用梯度升温策略，初始阶段控制在较低温度，加部分去离子水让预聚体初步分散；随后缓慢升温，加剩余水量以降低预聚体粘度、促进均匀分散；最后降温并保持一段时间，稳定体系以避免过度反应，兼顾分散效率与凝胶风险防控。加水量优化需结合产品固体含量需求与分散体稳定性，建立关联模型，若需提高固体含量，可调整亲水性扩链剂用量提升预聚体亲水性，同时减少加水量，平衡高固体含量与高稳定性。中和工艺优化需兼顾中和剂选择与中和时机，耐水

性要求高的产品优先选择挥发性强的中和剂，后续通过真空脱挥去残留；需低温储存稳定性的产品可选特定中和剂。中和时机应在预聚体降温后，搅拌确保中和完全再水性化分散，避免亲水性不足或预聚体自聚。

6 预聚体法优化效果的理论验证

6.1 合成效率提升的理论验证

通过原料优化与反应条件控制，预聚体法合成效率的提升可借助反应动力学理论与生产周期模型验证。从反应动力学角度，选用高活性原料并优化反应温度，能显著降低反应活化能、提高反应速率常数，大幅缩短预聚体制备时间。同时，动态监测反应进程可避免无效反应时间，进一步压缩总合成周期，满足工业化生产对效率的需求。从能耗与成本角度，反应条件的精细化优化可有效降低能耗，原料预处理能减少原料浪费、提升原料利用率。此外，水性化过程的协同优化显著提高了分散体合格率，减少返工成本，使综合生产成本明显下降，充分验证了优化策略在效率与经济性上的双重优势。

6.2 产品稳定性提升的理论验证

产品稳定性的提升可通过胶体化学理论与性能测试指标进行验证。从胶体化学角度，优化后预聚体的亲水性基团分布均匀，分散体颗粒表面电位绝对值明显提升，颗粒间排斥力显

著增强，静置储存时间大幅延长，无分层或沉淀现象；同时颗粒粒径分布窄化，提高了分散体的光学透明度与力学稳定性，符合高端应用对产品质量的要求。从性能测试角度，优化后的水性聚氨酯树脂产品耐水性、耐溶剂性与力学性能均显著提升，这些性能指标的改善，验证了预聚体结构优化与水性化过程控制对产品稳定性的积极作用，为产品在高要求领域（如汽车涂料、高端胶粘剂）的应用提供了理论支撑。

7 结论

本文通过对预聚体法合成水性聚氨酯树脂的原理、影响因素及优化策略的系统研究，得出以下核心结论：首先，预聚体的结构参数（分子量分布、异氰酸酯基团含量、亲水性基团分布）与水性化过程参数（分散温度、加水量、中和工艺）是决定合成效率与产品稳定性的关键因素，二者需协同控制才能实现最佳效果；其次，通过原料优化选择（如高活性多异氰酸酯、预处理低聚物多元醇、复合亲水性扩链剂）、反应条件精细化控制（梯度温度、动态反应时间、分阶段搅拌）及水性化过程协同优化（梯度升温分散、定量加水量、精准中和），可显著提升合成效率，大幅延长产品储存稳定性，同时改善产品耐水性与力学性能；最后，优化策略的理论验证表明，反应动力学的改善与胶体稳定性的提升是效率与稳定性同步优化的核心机制，为工业化应用提供了可靠的理论依据。

参考文献：

- [1] 邓丽桦,隋智慧,赵文菁,等.水性聚氨酯的改性研究进展[J].化工新型材料.2024,52(9).
- [2] 冯雷,葛腾旺,李彦伟,等.路用水性环氧树脂改性聚氨酯的制备及性能评价[J].化工新型材料,2025,53(8):217-224,228.
- [3] 栾皓嵬,徐文彪,李翔宇,等.水性聚氨酯发展及改性研究概况[J].林产工业.2023,60(1).
- [4] 刘国庆.大分子型紫外光固化水性聚氨酯的合成研究[D].湖北:武汉工程大学,2024.