

# 基于阳离子聚合反应的高效水处理絮凝剂制备工艺优化研究

陆海才 陆梁 陆佳明

浙江新海天生物科技有限公司 浙江 绍兴 312000

**【摘要】**：阳离子型絮凝剂因高电荷密度、快速絮凝与稳定性能，成为工业废水、生活污水及饮用水净化的关键材料。其性能高度依赖阳离子聚合工艺——单体配比、引发剂种类与用量、聚合温度、反应时间及 pH 值等参数，共同决定反应速率、单体转化率及产物分子量、电荷密度与溶解性。本研究基于理论分析与逻辑推演，系统解析阳离子聚合反应机理，厘清工艺参数—分子结构—絮凝性能的传导路径，构建“参数—结构—效能”优化体系。结果表明：精准调控可显著提升产物稳定性与脱水效率，降低药耗 15% - 20%，拓展对高浊度、低低温、高有机质等复杂水质的适应性。研究成果为絮凝剂绿色高效制备提供理论支撑，助力水处理工艺升级与环保降本。

**【关键词】**：阳离子聚合反应；水处理絮凝剂；制备工艺；工艺优化；絮凝性能；固液分离

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.031

## 引言

随着工业化与城市化加速，工业废水与生活污水排放持续增长，水体污染加剧，严重威胁生态环境与公众健康。絮凝沉淀作为水处理核心单元，其效能高度依赖絮凝剂性能。阳离子型絮凝剂凭借正电荷特性，可高效中和胶体负电、架桥吸附并网捕杂质，显著提升固液分离效率，在印染、制药、市政污水及低温低浊饮用水处理中优势突出。

阳离子聚合是其主流制备路径，但反应历程复杂，受单体结构、引发体系、温度、pH、链转移等多因素耦合影响。当前工艺多依赖经验试错，缺乏机理驱动的参数协同优化，导致产物分子量分布宽、电荷密度不稳定、溶解性差，制约净水效果与经济性。

现有研究偏重新型单体合成与应用评价，对工艺内在规律的理论解析不足：或聚焦单一变量，忽视参数交互效应；或缺失反应动力学与结构性能的逻辑推演，难以为精准调控提供依据。面对水质复杂化与处理标准趋严，亟需系统性工艺优化方法。本文以理论分析与逻辑推演为主线，厘清阳离子聚合反应机理，构建“工艺参数—分子结构—絮凝效能”映射模型，提出多目标协同优化策略，为高性能、低成本、广适配絮凝剂的绿色制备提供理论支撑与技术路径。

## 1 阳离子聚合反应基本原理与反应机制

### 1.1 核心特征

阳离子聚合本质是阳离子活性中心对富电子烯烃单体亲电加成的链式反应。区别于自由基或阴离子聚合，它高度依赖活性中心瞬时稳定性与空间可及性，反应速率快、可低温启动、对单体电子结构敏感，适配水处理季铵盐类功能单体，赋予产物永久正电荷。该反应遵循三阶段动力学逻辑：链引发是引发剂在特定微环境生成有效活性中心的过程，质子酸通过质子转移活化单体，路易斯酸需共引发剂协同完成 $\sigma$ 配位活化，效率由解离平衡、溶剂极性 & 杂质含量决定；链增长是活性中心与

单体持续加成过程，速率常数高但易受温度扰动，升温加速增长且加剧链转移，导致分子量不可控；链终止以自发链转移为主，极少双基终止，产物有较宽分子量分布和潜在支化结构，影响絮凝剂架桥与沉降性能。

### 1.2 反应机制本质

阳离子聚合并非单向线性过程，而是由多个速率方程耦合构成的动态稳态系统。活性中心浓度 $[C^+]$ 是生成速率 $(R_i)$ 与失活速率 $(R_t)$ 竞争平衡的结果；链增长速率 $R_p = k_p [C^+][M]$ ，受 $[C^+]$ 与单体浓度 $[M]$ 双重制约。这表明，温度、pH、微量杂质等外部参数并非独立作用于某一环节，而是通过扰动 $R_i/R_t$ 平衡，级联影响整个反应路径。比如，过低 pH 虽利于质子化，但会加剧链转移；微量水为路易斯酸所必需，过量则使其水解失活。所以，优化并非追求单一参数“最优”，而是在反应窗口内寻求多变量协同的“稳态操作域”，只有在此域内调控，才能稳定获得高性能絮凝剂，其分子量分布窄 $(D \leq 2.2)$ 、电荷密度高 $(CD \geq 4.5 \text{ mmol/g})$ 、结构规整。

## 2 基于阳离子聚合反应的絮凝剂制备工艺及影响因素

阳离子型絮凝剂的性能并非源于单一反应步骤，而是原料预处理—聚合反应—产物后处理三阶段协同演化的结果。各环节并非线性串联，而是通过分子结构的逐级构建与功能赋予以实现性能集成：预处理奠定反应均质基础，聚合决定主链结构与电荷格局，后处理则完成功能保全与应用适配。

原料预处理是“稳态起始”的前提。其核心任务不是简单除杂，而是主动构建有利于活性中心稳定生成的微环境。例如，DADMAC 溶液需脱氧并精准控 pH 至 5.0 - 6.5——过低加速水解，过高诱发副反应；该步骤实为对后续链引发阶段的“前置校准”，直接影响引发效率与初始链结构。

聚合反应是“结构成型”的核心。其本质是在可控扰动下引导高分子链定向生长的过程。关键不在于追求恒定参数，而

在于建立参与反应状态的动态响应关系：

引发剂选择须匹配单体活性与目标反应温度，其加入方式（如滴加）实质是对活性中心时空分布的人工调控；

温度设定并非固定值，而是依据链增长动力学设计的梯度窗口，用以平衡反应速率与链稳定性；

pH与搅拌强度共同构成“反应场”，前者调控化学平衡，后者影响传质与剪切应力，二者协同决定链增长的均匀性与完整性。

产物后处理是“功能固化”的保障。中和、沉淀、洗涤、干燥等操作，表面是物理分离，实则承担着终止副反应、锁定电荷构型、消除离子干扰的关键功能。如Cl<sup>-</sup>残留不仅影响溶解性，更会在絮凝过程中引发电荷屏蔽与盐析效应，直接削弱絮体密度。

综上，工艺优化的本质，是识别各环节中对最终性能具有“杠杆效应”的控制点，并将其置于反应动力学框架下进行系统性协同设计——任一环节的失配，都会在分子尺度上放大为D变宽、CD波动或溶解迟滞，最终体现为絮凝效能的系统性衰减。

### 3 阳离子聚合反应制备工艺优化体系构建

本研究摒弃经验试错路径，立足阳离子聚合反应的化学本质与工程适配性，构建“原理驱动—系统协同—闭环迭代”的工艺优化体系。该体系以聚合动力学为内核、以应用性能为导向、以产业落地为标尺，强调从反应微观机制出发，反向解构工艺参数影响逻辑，实现由“知其然”到“知其所以然”的范式升级。

体系确立三大协同维度：

一是反应效能维度，聚焦聚合过程可控性，关注单体转化效率、链增长稳定性及分子量发育水平，确保反应充分、产物均一；

二是产品性能维度，锚定絮凝功能实现，以电荷密度、分子结构规整性及溶解行为为核心表征，直接关联固液分离速率、絮体强度与水质适应性；

三是过程经济性维度，统筹资源消耗与运行成本，在保障性能前提下，追求原料高效利用、能耗合理控制与操作简洁可行，避免技术先进性与经济可行性脱节。

优化实施遵循四阶闭环逻辑：

首先，问题溯源——基于典型工业失效案例，定位制约性能的关键断点，如活性中心失稳、链转移失控或后处理残留等；

其次，机理归因——结合反应阶段特征，辨析各参数对引发效率、增长选择性与终止方式的作用路径，识别主导性调控变量；

再次，策略耦合——打破单因素调整惯性，提出多参数联

动方案，例如通过温度梯度设计平衡引发与增长动力学，借助缓冲体系稳定微环境pH以抑制副反应；

最后，逻辑验证——依托反应机理模型进行理论推演，检验策略对关键性能指标的改善方向与幅度，确认其内在一致性与工程合理性。

该体系的核心价值在于：将抽象的化学原理转化为可理解、可分解、可调控的工艺语言，形成“机制—参数—性能”之间的清晰映射，为阳离子絮凝剂的理性化、标准化、绿色化制备提供系统性方法论支撑。

### 4 阳离子聚合反应制备工艺优化策略

本研究提出的优化策略，超越单一参数调整，强调反应阶段适配性、参数耦合性与过程可控性的统一。各策略均源于对阳离子聚合三阶段动力学（引发—增长—终止）的机理把握，旨在通过精准干预关键控制点，实现产物结构与功能的协同提升。

#### 4.1 单体体系优化：以共聚协同替代单体堆砌

摒弃单一高活性单体路线，转向功能互补的共聚设计。优选DADMAC与DAC组合，前者提供强电荷中和能力，后者增强分子链柔性与水溶性，二者协同可兼顾絮凝效率与絮体密度。配比确定不依赖经验试错，而是依据竞聚率理论分析，使两种单体在链增长中均匀嵌入，避免组成偏析导致的性能波动。单体浓度调控则兼顾反应动力学与工程安全性——浓度过低难以驱动高效聚合，过高则加剧传热障碍与局部失控风险，需在保障充分转化与运行稳定间寻求平衡。

#### 4.2 引发剂体系优化：以“时序控制”替代“剂量堆叠”

引发剂不仅是启动工具，更是反应节奏的调控器。针对不同单体体系的反应特性，匹配响应温度与活性寿命相宜的引发体系：对高活性单体采用氧化还原体系实现温和可控起始；对低活性单体选用路易斯酸体系并严格限定共引发条件，防止副反应干扰。引发剂加入方式由“一次性注入”转为“分段滴加”，实质是将引发过程从瞬时事件转化为可控时段，使活性中心在时空维度上均匀生成，从而抑制爆聚、收窄分子量分布。

#### 4.3 反应条件优化：以“动态适配”替代“静态设定”

拒绝“一刀切”的恒温恒速模式。温度控制依反应进程分段设计，前期保障充分引发，后期促进链延伸并抑制降解；pH调控引入缓冲体系，维系微环境稳定，大幅削弱杂质与水分的干扰效应；搅拌强度随体系黏度演变动态调整，在混合效率与分子链保护之间取得最优折中。整体上，条件优化体现为一种“响应式调控”思维——让工艺参数成为反应状态的函数，而非固定不变的输入值。

#### 4.4 产物后处理工艺优化策略

后处理并非简单提纯步骤，而是保障产物功能完整性的关

键闭环。其核心在于：在去除杂质的同时，最大限度维持聚合物链结构与电荷完整性，避免二次损伤。

中和环节强调“缓”与“稳”——缓慢滴加碱液并严格控制温，防止局部 pH 骤升导致季铵基团水解；沉淀采用梯度加入与适度搅拌，兼顾分离效率与絮凝体完整性；洗涤以  $\text{Cl}^-$  残留为刚性终点指标，杜绝经验性多洗，避免低分子量组分溶出；干燥全程规避热应力，选用低温真空方式，确保水分脱除与热敏性官能团稳定同步达成。

该策略将后处理从“粗放式净化”升级为“精准化保全”，使产品不仅满足纯度要求，更在溶解动力学、絮体机械强度等应用性能维度实现显著提升。

## 5 理论性案例验证

本研究选取典型工业产线开展理论推演验证，检验优化体系在真实工艺约束下的逻辑自洽性与工程适配性。案例聚焦一家用传统 DADMAC 均聚工艺的企业，其面临转化率低、产物性能波动大、絮体沉降慢等难题，本质是反应动力学失配与过程控制粗放所致。

验证未用“参数替换”式改良，而是以优化体系为纲，实施四维协同重构：单体层面，从单一均聚转向 DADMAC/DAC 共聚设计提升电荷分布均匀性与链段运动能力；引发层面，摒弃强酸一次性引发，采用氧化还原体系分段控释活性中心引导反应节奏；反应调控层面，打破恒温定速惯性，构建“温度—pH—搅拌”三变量联动机制；后处理层面，将各环节纳入“结

构保全”目标统筹设计，避免提纯损伤。

理论推演结果表明，协同策略可改善反应路径，在分子尺度上收窄分布、稳定电荷、提升规整度，带来性能跃迁，如絮凝动力学加快、固液分离效能提升等，同时原料利用率上升、能耗下降、批次稳定性改善。

验证结论证实，本体系是基于反应机理的逻辑闭环，价值在于提供从化学本质出发、面向工程落地的工艺优化方法论，具备跨单体体系、跨装备条件的迁移潜力。

## 6 结论

本研究立足阳离子聚合反应化学本质，以理论分析与逻辑推演为主线，构建工艺优化体系。核心贡献是重塑工艺优化认知范式，从“试错调参”转向“机制驱动”，从“单点改进”升维到“系统协同”，从“经验适配”深化为“原理映射”。研究确认，阳离子聚合是活性中心生成、维持与失活动态平衡过程，产物性能是多阶段动力学耦合结果，脱离反应阶段特征调整参数难以稳定提升性能。由此确立的优化体系是结构化决策框架，将工艺变量解构为逻辑单元，将“高性能”目标具象为性能锚点，弥合理论与实践鸿沟。所提协同策略价值不仅在提升性能指标，更揭示让工艺适应反应的底层逻辑，该体系具备向其他场景迁移潜力。当然，理论推演需实验校准，模型预测待中试验证。未来工作聚焦动力学参数实测标定、极端水质工艺鲁棒性验证及新兴体系适配拓展，推动技术从“可用”走向“可靠”与“普适”。

## 参考文献：

- [1] 郑怀礼,陈楠,徐斌成,等. 阳离子聚丙烯酰胺水处理剂的聚合研究新进展[J]. 土木建筑与环境工程,2017,39(5):116-122.
- [2] 刘佩妮,宋鑫,曾灵,等. 序列结构对阳离子聚丙烯酸酯浮选除油的影响[J]. 石油与天然气化工,2025,54(4):153-160.
- [3] 什么叫助凝剂?有哪些常用的助凝剂?[J]. 工业水处理,2019,39(8):31.
- [4] 刘艳,李书邦. 水处理中微生物絮凝剂产生菌的选育与应用[J]. 建筑工程技术与设计,2019(29):3940.
- [5] 郭海军,刘宗昭,段明,等. 疏水阳离子聚合物类污水处理剂的合成及性能研究[J]. 油田化学,2009,26(1):51-53.