

环保型阻垢剂的研发进展与工业应用

陈艺荣, 李 刚*

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年4月8日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月22日

摘 要

阻垢剂作为抑制结垢、延缓腐蚀的关键化学药剂, 在工业水处理、油田开发及能源工程等领域具有重要应用价值。本文系统综述了阻垢剂的分类、作用机理及近年来的技术创新, 重点分析了聚合物类、绿色环保型及多功能复合阻垢剂的开发与应用。通过典型案例展示了阻垢剂在高温、高浊、高矿化度等复杂工况下的性能表现, 并探讨了现有技术的局限性及未来发展方向。本文结合实验研究、分子模拟和现场应用数据, 旨在为阻垢剂的研发与工程化应用提供理论支持和技术参考。

关键词

多功能阻垢剂, 绿色阻垢剂, 特殊工况

Development Progress and Industrial Application of Environmentally Friendly Scale Inhibitors

Yirong Chen, Gang Li*

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

Received: Apr. 8th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 22nd, 2025

Abstract

Scale inhibitors, as key chemical agents for inhibiting scaling and delaying corrosion, have important application value in industrial water treatment, oilfield development, and energy engineering. This article systematically reviews the classification, mechanism of action, and technological innovations of scale inhibitors in recent years, with a focus on the development and application of polymer based, green and environmentally friendly, and multifunctional composite scale inhibitors.

*通讯作者。

The performance of scale inhibitors under complex working conditions such as high temperature, high turbidity, and high mineralization was demonstrated through typical cases, and the limitations of existing technologies and future development directions were discussed. This article combines experimental research, molecular simulation, and field application data to provide theoretical support and technical reference for the development and engineering application of scale inhibitors.

Keywords

Multifunctional Scale Inhibitor, Green Scale Inhibitor, Special Working Conditions

Copyright © 2025 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

结垢是工业生产和能源开发中普遍存在的难题,尤其在油田注水、循环冷却水系统及隧道排水管道等场景中,水垢沉积会导致设备效率下降、管道堵塞甚至安全隐患[1]。阻垢剂通过螯合增溶、晶格畸变和分散作用抑制结垢过程,已成为最经济有效的解决方案之一[2]。然而,传统阻垢剂(如有机膦类)存在环境污染、耐温性差等问题,推动绿色环保型阻垢剂及多功能复合配方的开发成为研究热点[3]。本文结合近年文献,系统梳理阻垢剂的技术进展,以期为后续研究提供参考。

2. 阻垢剂的分类与作用机理

2.1. 主要类型

阻垢剂根据化学结构可分为以下几类。有机膦类阻垢剂,如氨基三亚甲基膦酸(ATMP)。其作用机制主要是螯合作用诱导晶格畸变,膦酸基团通过螯合 Ca^{2+} 抑制晶体成核,表面吸附效应改变晶体生长路径。阴离子型 HEDP 凭借静电排斥产生空间位阻效应,有效抑制微晶团聚。高温稳定性显著, HEDP 在 250°C 环境保持稳定, C-P 键的特殊结构赋予材料优异抗水解性能。该类化合物兼具多重功能,既能在碳钢表面形成 Fe-HEDP 复合保护膜,又可实现阻碳酸盐垢的协同控制。实际应用存在双重制约,针对 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 的阻垢效率仅 40%-50%,需协同使用聚丙烯酸等分散剂强化效果,同时也带来了环境残留问题,反渗透系统富集的 HEDP 导致出水总磷超标,须通过活性炭吸附或臭氧氧化进行深度处理[4]; 聚合物类阻垢剂,羧酸类阻垢剂通常以丙烯酸(AA)、马来酸(MA)等羧酸单体为核心,通过均聚或共聚形成。羧酸类聚合物羧酸基团(-COOH)丰富、分子结构可调控,这些因素使其在螯合金属离子、抑制晶体生长及分散微晶颗粒方面效果显著,不仅无磷、无氮,还对环境友好,但对钙容忍度较低[5]。磺酸类共聚物阻垢剂是一类通过引入磺酸基团(-SO₃H)高分子聚合物,广泛应用于工业水处理领域。其核心优势在于磺酸基的强亲水性及对高价金属离子的稳定螯合能。磺酸基可以干扰 CaCO_3 或 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 晶体生长方向,形成松散结构。磺酸基的亲水性增强颗粒表面负电荷,防止微晶团聚沉积; 绿色环保型阻垢剂绿色环保型阻垢剂主要是天然高分子阻垢剂以植物、动物或微生物来源的大分子物质为基础,通过化学改性或复配技术提升阻垢性能,代表物质包括植物提取物(单宁酸、木质素衍生物)、壳聚糖、淀粉及纤维素等。合成绿色阻垢剂通过可控的化学合成工艺制备,兼具高效阻垢性能与环保特性,代表物质包括聚天冬氨酸(PASP)和聚环氧琥珀酸(PESA)。兼具生物降解性和高效阻垢能力[6]; 多功能复合阻垢剂多功能复合阻垢剂是指通过化学复

配或分子结构设计, 兼具阻垢、缓蚀、杀菌、分散等多种功能的一类水处理剂。其核心组成通常包括咪唑啉缓蚀阻垢剂(MZ-P), 同时具备缓蚀、阻垢和杀菌功能[7]。杨光等团队研发了一种多功能固体缓蚀阻垢剂(SPCI-1)。该药剂集缓蚀、阻垢、除氧、杀菌功能于一体, 由改性咪唑啉缓蚀剂(缓蚀率 86%)、有机膦阻垢剂(CaCO_3 阻垢率 93.3%, CaSO_4 阻垢率 98.9%)、1227 杀菌剂及抗坏血酸除氧剂等组分通过熔融法成型, 粒径 4~8 mm, 密度 1.20~1.50 g/cm³ [8]

2.2. 阻垢机理

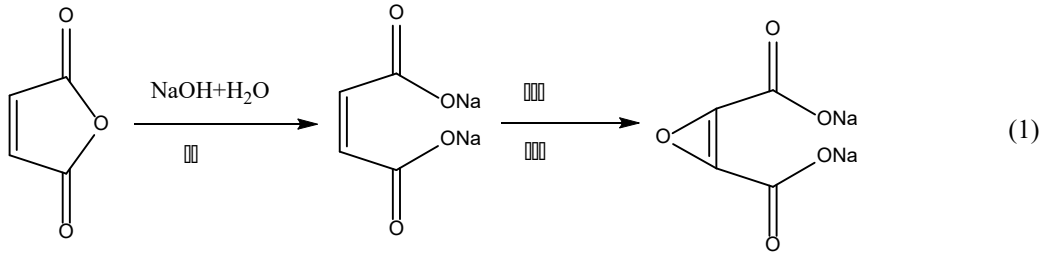
阻垢剂通过干扰垢类晶体的成核、生长或沉积过程实现阻垢效果, 其核心作用机制包括晶格畸变、螯合作用和分散作用。螯合增溶: 螯合作用机[9]的核心在于调控离子络合反应的化学平衡。多齿配位体如 DTPA、EDTA 等凭借多个配位位点与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等成垢离子结合, 形成热力学稳定的环状螯合物。该过程显著降低液相中游离钙离子的有效浓度, 迫使离子浓度积持续低于溶度积阈值, 进而抑制晶体成核过程。晶格畸变: 晶格畸变是在晶体生长过程中发生的一种分子级变化, 阻垢剂的介入则会对其产生干扰, 造成晶体结构发生变化。阻垢剂发挥效用的一个关键在于其能牢牢吸附在晶核表面、晶面边缘等关键的晶体生长活性位点, 晶格畸变表现为晶体有序排列遭到破坏。极性基团, 比方说羧基、磺酸基, 它们是阻垢中发挥重要作用, 这些极性基团与钙离子、钡离子之类的晶体表面离子形成配位键, 牢牢吸附于晶体表面, 晶体原本整齐的面貌不复存在, 晶面能的分布被彻底打乱, 进而让晶体的向无序化生长, 最终产物成了结构松散、孔隙遍布的非致密结构。分散作用: 分散作用机制主要有静电斥力和空间位阻, 带负电的基团(譬如- SO_3^-)电离后电位, 绝对值, 由此产生的双电层排斥力是一种重要的途径, 另一条途径, 诸如聚天冬氨酸(PASP)、聚丙烯酸(PAA)一类的高分子, 其长链吸附于微粒表层, 依靠链段舒展构建起空间位阻, 同样可以避免微粒聚集。高分子链在微粒表面的吸附, 以及负电荷的积累都很重要, 静电排斥、空间位阻都能避免微粒互相吸引。

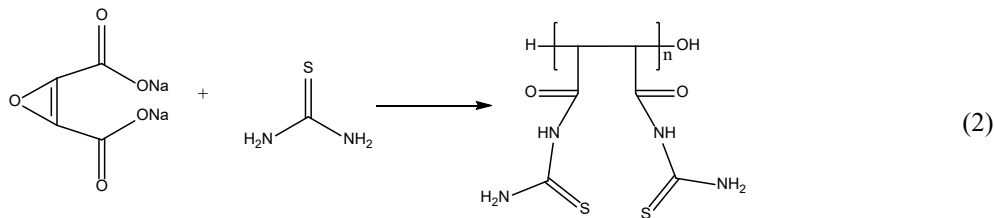
3. 新型阻垢剂的开发与技术创新

3.1. 绿色环保型阻垢剂

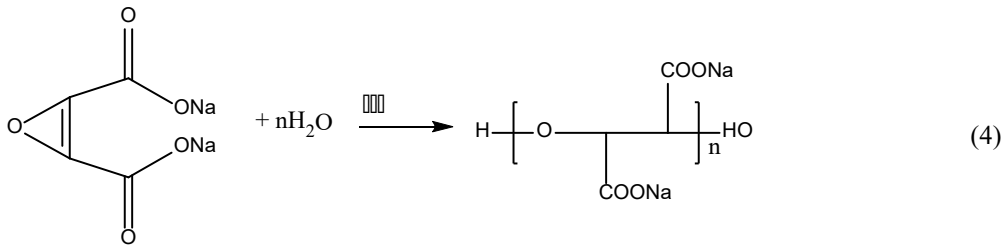
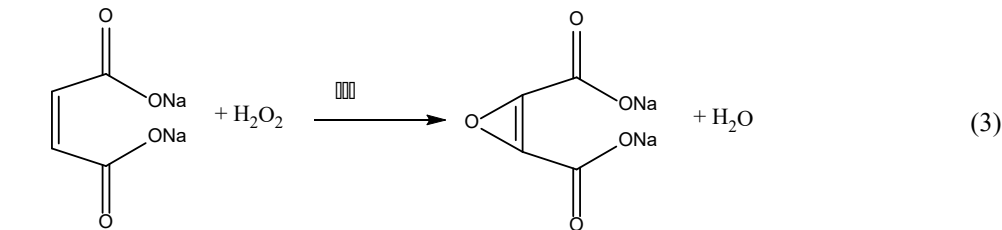
1) 聚环氧琥珀酸(PESA)改性:

引入氨基(— NH_2): 肖静[10]等用马来酸酐为原料合成聚环氧琥珀酸(PESA), 并通过硫脲改性制备了高性能阻垢缓蚀剂 CSN-PESA。研究表明, 改性后的 CSN-PESA 在阻垢和缓蚀性能上显著优于未改性的 PESA。当 Ca^{2+} 浓度 ≤ 350 mg/L 时, CSN-PESA 对碳酸钙和磷酸钙的阻垢率分别达 96.1%和 86.3%, 较 PESA 提高了 6%和 22.1%; 缓蚀率提升至 93.4%, 成本降低 5%。机理分析表明, CSN-PESA 分子中的酰胺基和氨基增强了与钙离子的螯合作用, 并通过吸附在晶体表面引发双电层效应, 使碳酸钙和磷酸钙晶格畸变为松散霰石或片状结构, 抑制沉淀生成。此外, CSN-PESA 可在碳钢表面形成保护膜, 减少腐蚀坑的形成, 缓蚀性能提升显著。经济性分析显示, 其成本较 PESA 降低 0.15 万元/吨, 兼具环保优势(无磷排放)与高性价比, 适用于低钙工业循环水处理。





引入羧基(-COOH): 柳鑫华等[11]等以聚环氧琥珀酸(PESA)为基体, 通过自由基聚合引入衣康酸(IA)制备了新型无磷环保阻垢缓蚀剂 IA-PESA。IA-PESA 对 CaCO₃ 和 CaSO₄ 的阻垢率分别达 90%和 95%以上, 较 PESA 显著提升。IA-PESA 对 Fe (III)的分散能力和 Zn²⁺的稳定性能分别较 PESA 提升约 20%和 30%, 缓蚀率提高至 65.6% (PESA 为 60.1%)。IA-PESA 分子中增加的羧基通过螯合钙离子、干扰晶格生长, 使 CaCO₃ 和 CaSO₄ 由致密方解石结构转变为松散霏石或片状结构, 抑制沉淀形成; 同时, 其可在碳钢表面形成保护膜, 减少腐蚀坑和点蚀。



将上述两个阻垢剂做对比如表 1 所示, CSN-PESA(硫脲改性)与 IA-PESA (衣康酸共聚)均为环保型阻垢缓蚀剂。CSN-PESA 对碳酸钙阻垢率达 96.1% (11 mg/L); IA-PESA 对 CaCO₃ 阻垢率超 90%。二者均通过晶体畸变和络合作用抑制垢层生成, 性能优于传统 PESA。

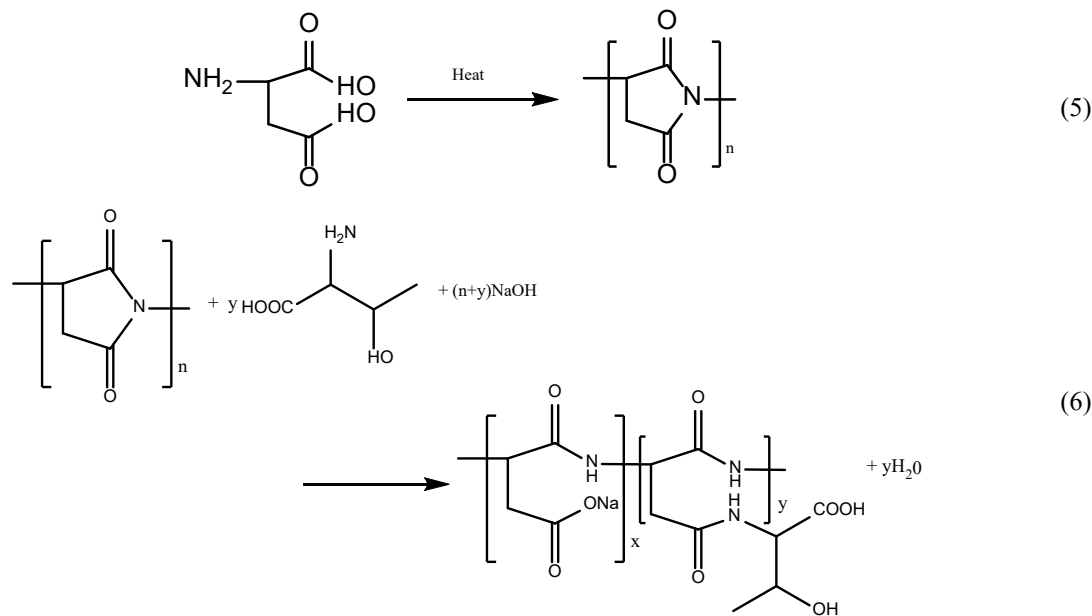
Table 1. Comparison of scale inhibitors and their inhibition efficiency
表 1. 阻垢剂及阻垢效果对比表

项目	改性聚环氧琥珀酸(CSN-PESA)	衣康酸改性聚环氧琥珀酸(IA-PESA)
原料	马来酸酐、硫脲	马来酸酐、衣康酸
改性方法	硫脲改性	衣康酸共聚
最佳投加量(mg/L)	11	8
碳酸钙阻垢率(%)	96.1	>90
环保性	无磷、可生物降解	无磷、可生物降解
主要机理	晶体畸变、静电排斥	晶体畸变、络合作用

2) 聚天冬氨酸(PASP)改性:

引入羟基(-OH): 姜媛[12]用聚琥珀酰亚胺(PSI)和 L-苏氨酸(L-THR)的胺解反应将羟基引入到聚天冬氨酸分子的侧链上, 制备了含羟基聚天冬氨酸衍生物。合成的含羟基 PASP 衍生物对 CaCO₃ 的阻垢率达 99.3%, 羟基通过增强螯合能力提升耐高钙性能。含羟基聚天冬氨酸衍生物有机质能够诱导沉淀 CaCO₃ 晶

体由方解石晶型转变为球霏石晶型, 并且改变 CaCO_3 晶体粒径的大小。复合纳米材料。



Cheng [13]等通过氨基功能化纳米二氧化硅($\text{SiO}_2\text{-NH}_2$)与聚琥珀酰亚胺(PSI)开环反应, 成功制备了有机-无机杂化阻垢剂 $\text{SiO}_2\text{-NH}_2/\text{PASP}$ 。阻垢剂添加量为 6 mg/L 时, 对 CaSO_4 的阻垢率接近 100% $\text{SiO}_2\text{-NH}_2/\text{PASP}$ 通过羧基螯合 Ca^{2+} 、吸附于晶面抑制晶体生长, 并引发晶格畸变(如 CaCO_3 由方解石向亚稳态球霏石转变)。该阻垢剂兼具高羧基含量(15.59%)、环境友好(无磷可降解)及经济性(低用量), 适用于工业循环水系统, 为绿色水处理技术提供了新策略。

如表 2 含羟基聚天冬氨酸衍生物通过聚琥珀酰亚胺与 L-苏氨酸胺解反应合成, 对 CaCO_3 阻垢率达 99.3% (较传统 PASP 高 3.2%), 其机理为羧基与羟基协同络合 Ca^{2+} , 调控 CaCO_3 晶型(方解石→球霏石)并分散颗粒。纳米 SiO_2 改性 PASP 通过 $\text{SiO}_2\text{-NH}_2$ 与 PSI 共聚制备, 阻垢率 68% (较纯 PASP 高 53%), 机理包括羧基螯合 Ca^{2+} 、纳米 SiO_2 吸附表面及晶格畸变效应。

Table 2. Comparison of modification performance of polyaspartic acid
表 2. 聚天冬氨酸改性性能对比表

阻垢剂名称	含羟基聚天冬氨酸衍生物	纳米 SiO_2 改性聚天冬氨酸($\text{SiO}_2\text{-NH}_2/\text{PASP}$)
合成方法	聚琥珀酰亚胺(PSI)与 L-苏氨酸(L-THR)在弱碱性水溶液中胺解反应合成。	氨基功能化纳米二氧化硅($\text{SiO}_2\text{-NH}_2$)与聚琥珀酰亚胺(PSI)共聚合成。
阻垢率	对 CaCO_3 阻垢率: 99.3%; 比传统聚天冬氨酸(PASP)高 3.2%	对 CaCO_3 阻垢率: 68%; 比纯 PASP 分别高 21%和 53%
阻垢机理	羧基与羟基协同络合 Ca^{2+} ; 调控 CaCO_3 晶型(方解石→球霏石); 分散晶体颗粒	羧基螯合 Ca^{2+} ; 纳米 SiO_2 吸附晶体表面; 晶格畸变和分散效应

3.2. 智能化与多功能化设计

荧光示踪技术: 周明等[14]等通过将荧光基团(如姜黄素)接枝至聚合物骨架(如马来酸酐-对苯乙烯磺酸钠共聚物), 实现阻垢与检测双重功能。以 PMS-g-Cur 为例, 其在 70℃ 下对 CaSO_4 阻垢率达 99.5%, 荧光强度与浓度线性相关($R^2 = 0.9954$), 可在线实时监测药剂浓度, 避免过量投加。该材料耐高温($\leq 70^\circ\text{C}$)及一定矿化度($\leq 20,000 \text{ mg/L}$), 兼具高效阻垢与智能检测优势, 为油田及工业水处理提供环保解决方案。

缓蚀 - 阻垢一体化：范冬艳等[15]通过油酸与二乙烯三胺合成咪唑啉中间体(MZ)，并进一步磷酸化改性制备出兼具缓蚀与阻垢性能的一体化药剂 MZ-Ph，合成路线如图 1 所示。MZ-P 在模拟油田环境(80℃、3 MPa CO₂、0.1 MPa H₂S)中，浓度为 200 mg/L 时对 N80 钢的缓蚀率达 91.32%，腐蚀速率降至 0.062 mm/a；对碳酸钙和硫酸钙的阻垢率分别为 85.2%和 83.9%。机理研究表明，MZ-P 通过化学吸附在金属表面形成疏水保护层，抑制腐蚀离子侵入，其分子中的亚磷酸基团和咪唑啉结构协同增强了吸附与阻垢能力。

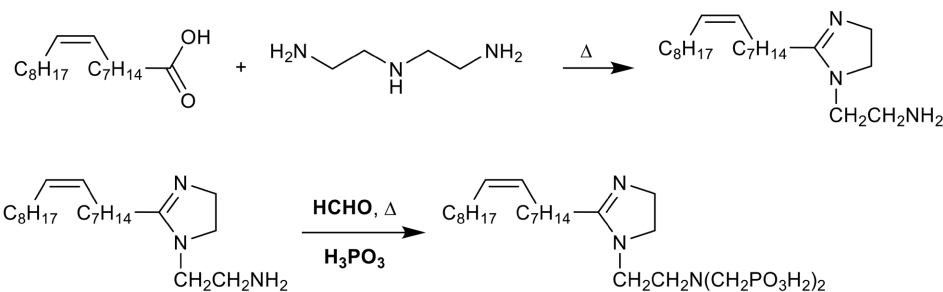


Figure 1. Synthetic route of MZ-P
图 1. MZ-P 合成路线

如下表 3 所示，PMS-g-Cur 聚合物以姜黄素、马来酸酐及对苯乙烯磺酸钠为原料，属绿色荧光阻垢剂，对 CaCO₃ 阻垢率为 82.8% (70℃)，兼具耐高温(>70℃)、耐盐特性及荧光浓度线性示踪功能，适用于油田开发与海水淡化。MZ-P 由咪唑啉中间体经磷酸化改性制得，为缓蚀阻垢一体化药剂，对 CaCO₃ 阻垢率达 85.2% (80℃, 200 mg/L)，通过化学吸附(ΔG = -43.88 kJ/mol)形成疏水膜，抗 CO₂/H₂S 腐蚀，适用于高压含硫油井环境。两者分别侧重在线监测与腐蚀协同控制。

Table 3. Summary of multifunctional scale inhibitors
表 3. 多功能阻垢剂一览表

对比维度	PMS-g-Cur 聚合物(绿色荧光阻垢剂)	MZ-P (咪唑啉缓蚀阻垢剂)
主要成分	姜黄素(Cur)、马来酸酐(MA)、对苯乙烯磺酸钠(SSS)	油酸、二乙烯三胺合成的咪唑啉中间体(MZ)，经磷酸化改性
阻垢剂类型	绿色荧光阻垢剂(含荧光标记功能)	缓蚀阻垢一体化药剂(兼具缓蚀与阻垢功能)
阻垢对象及效率	CaCO ₃ : 82.8% (70℃)	CaCO ₃ : 85.2% (80℃, 浓度 200 mg/L)
关键特性	耐高温(70℃以上性能稳定) 耐盐性能; 荧光强度与浓度线性相关(在线检测)	耐高温(80℃性能良好); 抗 CO ₂ /H ₂ S 腐蚀 - 疏水保护膜形成(接触角 76.65°); 化学吸附主导(吉布斯自由能 ΔG = -43.88 kJ/mol)
应用领域	油田开发、循环冷却水系统、海水淡化; 荧光示踪功能(实现阻垢剂浓度在线监测)	油田腐蚀与结垢控制(CO ₂ /H ₂ S 共存环境)

3.3. 分子动力学模拟 MD

化学阻垢剂抑制钙垢的效果显而易见，然而其分子层面组成与结构产生的具体影响、阻垢过程中繁复的物理化学变化，诸如晶核如何诞生、晶体怎样生长、吸附与脱附的机理、扩散过程，均会对阻垢机理产生作用，精准阐明阻垢机理依旧困难重重。目前学界针对阻垢机理的探索，主要借助紫外，可见光谱、扫描电子显微镜、X 射线衍射等传统手段，这些研究方法聚焦宏观表征，用以推断微观作用机理，我们对阻垢机理的认知仍不全面，诸多谜团尚待破解，未来的研究任重道远。

采用分子动力学模拟计算方法，研究阻垢剂在该体系中的阻垢机理。借助 Materials Studio，研究了阻垢剂的分子能量，以及在晶体表面的吸附力。张曙[16]研究采用分子动力学(MD)方法模拟了聚丙烯酸

(PAA)、聚甲基丙烯酸(PMAA)及丙烯酸-丙烯酸甲酯共聚物(AA-MA)与方解石晶体(CaCO_3)的相互作用。结果表明,三种聚合物与方解石(110)面的结合能显著高于(104)面,结合能排序为 $\text{PAA} > \text{AA-MA} > \text{PMAA}$,表明 PAA 阻垢性能最优。结合能主要由库仑作用(包括离子键)主导,氢键贡献较弱,范德华作用(vdW)对结合不利。对关联函数($g(r)$)分析显示,晶面 Ca^{2+} 与聚合物羧基 O 形成离子键,而羟基 H 与晶面 O 形成氢键。动力学行为表明,聚合物链中部羧基运动幅度小、结合稳定,较链端羧基更有效抑制晶体生长。此外,聚合物与晶面结合时发生形变,但形变能远低于非键作用能。本研究为聚羧酸类阻垢剂的分子设计及机理阐释提供了理论依据。

4. 应用案例分析

4.1. 油田开发领域

低分子量聚丙烯酸-镧离子复配体系:汪成等[17]开发了一种低分子量聚丙烯酸(LPAA)与镧离子(La^{3+})复配的防垢缓蚀体系。在渤海油田应用中,复配低分子量聚丙烯酸(50 mg/L)与镧离子(15 mg/L),阻垢率达 95%,同时腐蚀速率降至 $0.055 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。LPAA 通过吸附抑制 CaCO_3 晶核规则生长,使其形貌由立方体转变为疏松球状; La^{3+} 则通过金属表面吸附形成保护膜,减少腐蚀产物沉积。现场应用显示,加注该体系后地热水悬浮物含量由 189 mg/L 降至 26 mg/L,腐蚀速率从 0.8655 mm/a 降至 0.0554 mm/a,成功缓解了管道堵塞与腐蚀问题。多功能固体缓蚀阻垢剂:杨光等[18]研制了一种多功能固体缓蚀阻垢剂 SPCI-1。该剂由改性咪唑啉缓蚀剂、有机膦阻垢剂、杀菌剂及粘合剂等组成,兼具缓蚀、阻垢、除氧和杀菌功能。70℃条件下其缓释周期超 3 个月,缓蚀率 $> 85\%$,碳酸钙和硫酸钙阻垢率分别达 71.1%和 87.9%,杀菌率 $>99\%$ 。现场应用中,100 余口井的腐蚀速率降至 0.041 mm/a,缓蚀率超 85%,显著降低了管壁沉积与腐蚀风险。相较于传统液体药剂,SPCI-1 具有长效缓释、耐高温、易投放等优势,可延长井筒寿命并减少维护成本。

4.2. 工业水处理系统

高温高浊水处理:王坤鹏等[19]研发了一种新型低磷环保缓蚀阻垢剂。该剂以十七烷基羟乙基咪唑啉季铵盐(22%)、增效剂(5%)、聚天冬氨酸(13%)、锌盐(20%)及 2-磷酸基-1,2,4-三羧酸丁烷(8%)复配而成。实验表明,在 40 mg/L 投加量下,碳钢腐蚀速率为 0.0278 mm/a,缓蚀率达 93.86%,碳酸钙阻垢率超 85%,且药剂半衰期延长至 20~24 小时(传统药剂为 8~10 小时),显著降低用量。该配方通过增效剂提升稳定性,兼具低磷环保特性,有效解决了高温高浊水系统的腐蚀与结垢难题,为工业循环水处理提供了高效、经济且环境友好的解决方案。反渗透系统动态阻垢:乔晓时等[20]研究聚焦聚合物阻垢剂 RENATUR2101 的分散机理,发现其通过电荷排斥与晶格畸变抑制 CaCO_3 生长,形成松散水渣悬浮。对比某石化污水回用反渗透系统的进口药剂,RENATUR2101 在相同投加量(2~3 mg/L)下清洗周期相近(30~47 天),脱盐率维持 97%以上,且无磷环保。现场应用表明,其性能媲美进口产品,但成本降低 30%~50%。该研究为国产阻垢剂在污水回用领域的推广提供了技术支撑,兼具环境与经济效益,适用于污水回用工程。

4.3. 特殊场景应用

隧道排水管道双层涂层:胡家玮等[21]提出了一种新型双层阻垢疏水涂层,用于抑制隧道排水管道中方解石型碳酸钙结晶体的形成。该涂层由疏水内层和阻垢外层组成:内层以纳米二氧化硅、硅烷偶联剂等材料为基础,通过疏水性和自清洁性能减少结晶附着(防结晶率 82%);外层采用 EDTA、氨基磺酸和水解马来酸酐等阻垢剂,通过缓释作用抑制结晶生成阻垢率 93%。该涂层通过分层协同作用显著降低结晶堵塞风险,兼具优异的疏水、阻垢和耐久性能,为隧道排水系统维护提供了创新解决方案。生物基阻垢

剂: 吕小改等[22]研究了毛薯水提物(HPE)的制备及其在工业循环冷却水系统中的阻垢与缓蚀性能。在 200 mg/L 浓度下对 CaSO_4 阻垢率接近 100%, 毛薯提取物中羟基、羧基等官能团通过与 Ca^{2+} 络合抑制结垢, 同时通过吸附成膜减缓金属腐蚀。该成果为开发环保型植物基水处理剂提供了理论支持, 但实际应用中需进一步优化其高温、高钙离子环境下的稳定性, 展现了天然产物的应用潜力。

5. 挑战与未来方向

5.1. 当前问题

复杂工况适应性: 高矿化度环境中, 大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子会与阻垢剂分子中的活性基团(如羧酸、磷酸基团)竞争结合, 导致阻垢剂螯合能力饱和[23]。高盐度会通过盐析效应降低阻垢剂的溶解度, 使其难以均匀分散于水中[24]; 高温会破坏阻垢剂的分子结构, 尤其是含酯键或酰胺键的聚合物[25]。高温可能使阻垢剂的羧酸基团($-\text{COOH}$)脱质子化($-\text{COO}^-$), 降低其与 Ca^{2+} 的螯合能力。高温促进 CaCO_3 从疏松的球霏石(vaterite)向致密的方解石(calcite)转化, 增加垢层附着力[26]。环保法规限制: 中国国家标准《GB 31570-2015 石油化学工业污染物排放标准》明确规定, 工业循环冷却水中总磷(以 P 计)的排放限值为 $\leq 1.0 \text{ mg/L}$ 。这一限制旨在减少磷排放对水体的富营养化影响。磷是藻类生长的关键营养元素, 过量排放会导致水体富营养化, 引发藻华、缺氧等问题, 破坏水生态系统。

5.2. 未来趋势

在阻垢剂技术领域, 全生物降解型阻垢剂的开发聚焦于天然提取物(如毛薯和姜黄素衍生物)的应用, 通过其生物降解性和无磷特性显著降低生态风险[22]; 智能化监测技术则结合荧光示踪与物联网传感器实时调控阻垢剂浓度[27]; 跨学科技术融合利用人工智能优化分子设计, 精准提升阻垢效率[28]。三者协同推动阻垢技术向绿色化、智能化和高效化发展, 但仍需突破天然材料热稳定性不足与智能化设备成本限制等瓶颈, 未来可通过纳米复合改性和边缘计算优化实现规模化应用。

6. 结论

阻垢剂技术正朝着绿色化、功能化和智能化方向发展。聚合物改性、纳米复合及生物基材料的应用显著提升了阻垢效率与环境适应性, 然而复合水垢抑制、长效稳定性及成本控制仍是主要挑战。未来需加强基础机理研究, 推动阻垢剂在工业与能源领域的规模化应用, 助力可持续发展目标的实现。

参考文献

- [1] 崔小明. 水解聚马来酸酐的生产和应用研究进展[J]. 精细与专用化学品, 2023, 41(5): 12-18.
- [2] 乔晓时, 万莹, 田慧颖. 环保型聚合物阻垢剂的机理探究及其在污水回用工程中的应用研究[J]. 精细与专用化学品, 2024, 42(2): 45-52.
- [3] 胡家玮, 王聪, 刘美婧. 一种抑制隧道排水管道中结晶体形成的双层阻垢疏水涂层[J]. 化工学报, 2025, 76(3): 1234-1245.
- [4] 汪成, 龙卫红, 龚页境, 等. 低分子量聚丙烯酸-铜离子在热水驱防垢缓蚀中的应用[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(2): 147-152.
- [5] 王坤鹏, 马荣材, 孙辉, 等. 新型低磷环保缓蚀阻垢剂在高温高浊水中的研究与应用[J]. 辽宁化工, 2025, 54(1): 153-156.
- [6] 范冬艳, 吴春平, 赵明霞, 等. 咪唑啉缓蚀阻垢剂的制备及性能评价[J]. 油气田地面工程, 2025, 44(1): 62-69.
- [7] 周勤岸, 文茹蓉, 马银萍, 等. 一种阻垢剂阻垢性能实验研究[C]//2024 年中国家用电器技术大会论文集. 佛山: 箭牌家居集团股份有限公司, 2024: 26-30.
- [8] 杨光, 陈堪贵, 谢瑞永. 南海东部油田多功能固体缓蚀阻垢剂的研制及应用[J]. 山东化工, 2025, 54(2): 220-223.

- [9] 周明, 陈卓. 一种新型绿色荧光阻垢剂的制备与研究[J]. 聚酯工业, 2024, 37(5): 21-23.
- [10] 肖静, 曾德芳. 改性聚环氧琥珀酸的合成及其阻垢缓蚀机理研究[J]. 工业水处理, 2017, 37(12): 68-71.
- [11] 柳鑫华, 王孟依, 贾静娴, 等. 衣康酸改性聚环氧琥珀酸的合成及其阻垢缓蚀性能的研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 168-177.
- [12] 姜媛. 含羟基聚天冬氨酸衍生物合成方法及阻垢性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2013.
- [13] Cheng, Y., Guo, X., Zhao, X., Wu, Y., Cao, Z., Cai, Y., *et al.* (2021) Nanosilica Modified with Polyaspartic Acid as an Industrial Circulating Water Scale Inhibitor. *npj Clean Water*, **4**, Article No. 46. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00137-y>
- [14] 周明, 陈卓. 一种新型绿色荧光阻垢剂的制备与研究[J]. 聚酯工业, 2024, 37(5): 21-23.
- [15] 范冬艳, 吴春平, 赵明霞, 等. 咪唑啉缓蚀阻垢剂的制备及性能评价[J]. 油气田地面工程, 2025, 44(1): 62-69.
- [16] 张曙光, 石文艳, 雷武, 等. 水溶性聚合物与方解石晶体相互作用的 MD 模拟[J]. 物理化学学报, 2005, 21(11): 6-12.
- [17] 汪成, 龙卫红, 龚页境, 等. 低分子量聚丙烯酸-铜离子在热水驱防垢缓蚀中的应用[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(2): 147-152, 159.
- [18] 杨光, 陈堪贵, 谢瑞永. 南海东部油田多功能固体缓蚀阻垢剂的研制及应用[J]. 山东化工, 2025, 54(2): 220-223.
- [19] 王坤鹏, 马荣材, 孙辉, 等. 新型低磷环保缓蚀阻垢剂在高温高浊水中的研究与应用[J]. 辽宁化工, 2025, 54(1): 153-156.
- [20] 乔晓时, 万莹, 田慧颖. 环保型聚合物阻垢剂的机理探究及其在污水回用工程中的应用研究[J]. 精细与专用化学品, 2025, 33(4): 20-22, 26. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3237.tq.20250317.1133.002.html>, 2025-03-26.
- [21] 胡家玮, 王聪, 刘美婧. 一种抑制隧道排水管道中结晶体形成的双层阻垢疏水涂层[J/OL]. 化工学报, 1-24. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1946.tq.20250303.1142.004.html>, 2025-03-26.
- [22] 吕小改, 张攀, 胡兰兰, 等. 毛薯提取物的制备及阻垢缓蚀性能研究[J]. 广州化工, 2024, 52(18): 47-49.
- [23] Li, Y., Zeng, H. and Zhang, H. (2023) Atomistic Simulations of Nucleation and Growth of CaCO_3 with the Influence of Inhibitors: A Review. *Materials Genome Engineering Advances*, **1**, e4. <https://doi.org/10.1002/mgea.4>
- [24] Zhu, Y., Li, H., Zhu, M., Wang, H. and Li, Z. (2021) Dynamic and Active Antiscaling via Scale Inhibitor Pre-Stored Superhydrophobic Coating. *Chemical Engineering Journal*, **403**, Article 126467. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126467>
- [25] Al-Roomi, Y.M. and Hussain, K.F. (2016) Potential Kinetic Model for Scaling and Scale Inhibition Mechanism. *Desalination*, **393**, 186-195. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.07.025>
- [26] Higashitani, K., Kage, A., Katamura, S., Imai, K. and Hatade, S. (1993) Effects of a Magnetic Field on the Formation of CaCO_3 Particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, **156**, 90-95. <https://doi.org/10.1006/jcis.1993.1085>
- [27] Zhang, S., *et al.* (2021) Experimental and Theoretical Studies of Fluorescent-Tagged Scale Inhibitors for Calcium Scale Inhibition. *Journal of Molecular Structure*, **1272**, Article 134157. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134157>
- [28] Qiao, S., Chen, Y., Li, J., Li, Y., Peng, T., Liang, J., *et al.* (2023) A Novel and Efficient CaCO_3 Scale Inhibitor in High-Temperature and High-Salinity Geothermal Systems: A Deprotonated Quadripolymer. *Journal of Applied Polymer Science*, **140**, e53581. <https://doi.org/10.1002/app.53581>