

耐高温耐盐聚合物驱油剂研究现状与展望

冯天意, 张兵杰, 张挺瑞, 王 硕, 杨心怡, 胡雷雷

华北水利水电大学生态环境学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年3月2日; 录用日期: 2026年3月25日; 发布日期: 2026年4月2日

摘 要

针对高温高盐油藏开采的迫切需求, 传统驱油剂因性能恶化难以满足开发要求。本文系统综述了耐高温耐盐聚合物驱油剂的研究进展, 重点探讨了纳米纤维素(NC)在该领域中的应用潜力。通过分析国内外研究现状, 本文总结了耐高温耐盐凝胶体系、聚合物体系及复配技术的发展趋势, 并探讨了将羧基化纤维素纳米纤维(CNF)与改性聚丙烯酰胺复配构建纳米复合驱油体系的可能性。

关键词

耐高温耐盐, 驱油剂, 纳米纤维素, 聚丙烯酰胺, 复配体系

Research Status and Prospects of Temperature- and Salt-Resistant Polymer Oil Displacement Agents

Tianyi Feng, Bingjie Zhang, Tingrui Zhang, Shuo Wang, Xinyi Yang, Leilei Hu

School of Eco-Environmental Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: March 2, 2026; accepted: March 25, 2026; published: April 2, 2026

Abstract

In response to the urgent demand for exploiting high-temperature and high-salinity reservoirs, traditional oil displacement agents fail to meet development requirements due to performance deterioration. This article systematically reviews the research progress of temperature-resistant and salt-tolerant polymer oil displacement agents, with a focus on the application potential of nanocellulose (NC) in this field. By analyzing the current research status domestically and internationally, this paper summarizes the development trends of temperature-resistant and salt-tolerant gel systems,

polymer systems, and composite technologies, and explores the possibility of constructing a nano-composite oil displacement system by compounding carboxylated cellulose nanofibers (CNF) with modified polyacrylamide.

Keywords

Temperature-Resistant and Salt-Tolerant, Oil Displacement Agent, Nanocellulose, Polyacrylamide, Composite System

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

石油类似于一个国家的“血液”，贯穿着国家发展的许多方面。随着全球经济复苏与能源需求持续攀升，我国石油消费与进口规模逐年扩大。据统计，2019年我国原油进口量突破 5×10^8 t，对外依赖度攀升至 72%，能源安全面临的外部风险显著增加[1]。与此同时，国内油气田开发已进入中后期阶段，易开采的常规油藏储量日益减少，开发重点逐渐转向高温、高盐、高钙镁离子浓度的复杂油藏——以胜利油田为例，此类高温高盐油藏资源量占总资源量的 31.8%，虽具备巨大开发潜力，却因苛刻的地层环境成为油气开采的“硬骨头”[2]。

2. 研究目的及意义

随着油气田开发的不断深入，尤其是在开发后期，油气开采面临的地层条件变得愈加复杂和苛刻，面临的挑战包括高温、高盐、高钙镁离子浓度等，这些都显著增加了开采难度。在高温高盐环境下，传统驱油剂性能急剧恶化，导致水油流度比升高，驱替效率低下，大量剩余油难以被有效动用。

为了增加采收率，需要针对油藏条件对驱油剂进行性能改造，本文研究旨在通过纳米纤维素掺杂的方式改善聚合物的耐温耐盐性能，从而在苛刻油藏条件下保持原有性能，增加石油的开采率。

3. 国内外研究现状

石油开采一直是我国重点发展项目，如何应对复杂苛刻的油藏环境成为了国内外学者的重点研究项目。以下为耐温耐盐体系研究现状的综述。

3.1. 耐温耐盐体系研究现状

3.1.1. 耐温耐盐凝胶体系

刘旭超[3]等人通过优选，确定了弱凝胶体系最佳配方为：P1 (1500 mg/L) + JLJ (750 mg/L) + WDJ (100 mg/L)，该体系具有良好的驱油效率和耐温抗盐性能。

贺伟[4]等人以丙烯酰胺和丙烯酸为主要反应单体，引入了耐温耐盐单体 NVP、疏水功能单体，通过共聚反应合成了具有疏水功能聚合物，并与酚醛树脂交联剂发生交联反应制备了耐温耐盐弱凝胶体系。所形成的弱凝胶的微观网络骨架明显、稳定性良好。

3.1.2. 耐温耐盐堵水技术

谢维伟[5]等人以膨润土(BT)、腐植酸钠(NaHA)为增强剂，过硫酸钾(KPS)为引发剂，利用丙烯酰胺

(AM)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)、N, N-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)制备了耐高温高盐聚合物冻胶堵水剂,具有良好的抗脱水性及封堵性能。

李海营[6]等人以改性阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)为主剂,以分子中含有杂环的有机胺为交联剂合成一种新型凝胶型堵剂。高温高盐的特殊条件下堵剂成胶固化时间为6~24 h,满足中原油田高温高盐油藏化学堵水的要求。

3.1.3. 耐温耐盐聚合物

1) 耐盐活性剂

辛寅昌[7]等人以不饱和醇作引发剂利用双金属氰化物(DMC)催化加成共聚环氧丙烷、环氧乙烷,然后磺化中和成盐,研制出一种耐盐活性剂。该活性剂的耐受矿化度范围大,能达到2000~150,000 mg/L,且能耐受钙镁离子浓度高达10,000 mg/L,为高矿化度稠油开采提供了一种新方法。

2) 耐温耐盐交联剂

王志鹏[8]等人使用聚丙烯酰胺和EOC系列交联剂,研制出能够适用于高温高盐油藏EOC系列交联剂和交联体系。该交联聚合物体系可用于油藏温度 $\leq 90^{\circ}\text{C}$ 、矿化度 $\leq 15 \times 10^4 \text{ mg/L}$ (其中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} \leq 7000 \text{ mg/L}$)下,能大幅提高采收率。

宋龙飞[9]等人向丙烯酰胺交联聚合物中引入耐温功能单体N-乙烯基吡咯烷酮(NVP)和N, N-二甲基丙烯酰胺(DMAA),以二乙烯苯为交联剂、甲醛和次硫酸氢钠和过硫酸铵为引发剂、钠土为稳定剂,制得耐温耐盐的共聚物颗粒。结果表明在 130°C 、矿化度为 $22 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 的条件下高温静置90天,交联聚合物颗粒仍处于吸水膨胀状态,储能模量约5000 Pa,这让交联聚合物的耐温耐盐性得以提高。

3) 耐温耐盐稠化剂

张小鑫[10]等人将丙烯酰胺(AM)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)、丙烯酰吗啉(ACMO)进行共聚,并引入聚乙烯醇纤维,通过反相乳液聚合反应合成了新型的聚丙烯酰胺共聚物p(AM/AMPS/ACMO),聚乙烯醇纤维改性(PAM/AMPS/ACMO)有较好的耐温耐剪切性能。

3.1.4. 耐温耐盐冻胶分散体系

张艳辉[11]等人以AMPS共聚物0.6%~1.0% + 复合酚醛交联剂0.5%~0.9% + 促胶剂0.08%~0.1%,优化了一套耐温耐盐本体冻胶体系,该体系能够耐温 90°C ,且具有良好的膨胀性和95%以上的封堵率,还能够满足疏松砂岩油藏调驱的技术要求。

上述研究展现了耐温耐盐功能材料的关键发展方向,该领域正从单一配方筛选向“分子设计-结构调控-复合增效”多层次体系演进。分子层面引入AMPS、NVP等单体提升聚合物稳定性;结构层面智能调驱体系矿场试验表现优异;复合层面纳米材料可增强体系性能。疏水缔合与梳形聚合物也改善了抗盐和剪切稳定性。未来将聚焦开发成本更低、适应性更广、功能更智能的新型材料体系。

3.2. 复配技术的研究现状

在石油开采中复配技术已经成为了提升开采效率和质量的重要手段,在近些年也在多方面都取得不错的效果。

3.2.1. 表面活性剂复配体系

孟庆阳[12]等人研究了不同配比的非离子表面活性剂烷基多糖苷(APG)和咪唑啉两性表面活性剂(LC)复合体系在高温高盐条件下的界面张力、泡沫量和泡沫稳定性等,最后发现当其复配配比为6:4且质量分数为0.3时,油水界面张力达到最低值,制备出了耐高温高盐的泡沫复合驱油体系。

3.2.2. 纳米二氧化硅复配

李兆敏[13]等人选用疏水纳米 SiO₂ 颗粒增强苯磺酸盐类耐温泡沫剂 HY-4 的高温稳定性, 在 150℃ 下, 复配泡沫体系对岩心的封堵能力优于 HY-4 泡沫体系, 疏水纳米 SiO₂ 颗粒可大幅增强泡沫稳定性, 提高泡沫体系的高温封堵能力。

3.2.3. 泡排剂复配

李宗蔓[14]等人以 DHPB、OA-12 和 2 号曼尼希碱作为主剂, 与三乙醇胺、EDTA 等助剂复配, 获得了一种耐高温、耐高盐、耐高钙镁离子、具有缓蚀功能的新型耐温耐盐缓蚀泡排剂。DHPB 与 OA-12 的复配优化了泡排剂的亲水 - 疏水平衡, 提高了其在高温和高盐环境下的稳定性。钙镁离子掩蔽剂 EDTA 有效减少了钙镁离子对泡排剂的影响, 提升了耐盐性能。

3.2.4. 增强剂复配

王翔[15]等人通过 10% 单体丙烯酰胺 + 0.3% 耐高温聚丙烯酰胺 SDP-1 + 0.3% V 型交联剂 + 0.01% 引发剂 V-50 + 0.8% 复配增强剂耐高温改性淀粉 + 模拟地层水研制出耐温抗盐且承压良好的暂堵化学桥塞体系来应对垮塌漏失情况, 结果表现出良好的耐温抗盐和承压能力。

Table 1. Performance comparison of typical temperature-resistant and salt-tolerant polymer systems

表 1. 典型耐温耐盐聚合物体系性能对比

体系类型	耐温极限(°C)	耐盐极限(mg/L)
弱凝胶调驱体系	97.8~120	26,142~40,300
化学堵水剂	130~140	$35 \times 10^4 \sim 2.18 \times 10^5$ (含高 Ca ²⁺ /Mg ²⁺)
交联聚合物体系	90~130	$15 \times 10^4 \sim 22 \times 10^4$ (Ca ²⁺ + Mg ²⁺ ≤ 7000 mg/L)
表面活性剂体系	80	$3 \times 10^4 \sim 15 \times 10^4$ (含高 Ca ²⁺ /Mg ²⁺)
压裂液稠化剂	120~150	≤ 2×10^5 (MgCl ₂ /CaCl ₂)
化学交联体系	130~140	$6.0 \times 10^4 \sim 2.4 \times 10^5$
界面协同复合体系(包含纳米体系)	150~160	至 2.5×10^4 (高钙镁离子耐受)

在综合考量表 1 所示数据的基础上, 复合体系展现出更为优越的综合性能表现。具体而言, 复配技术可视为一种基于分子间相互作用、旨在实现功能协同增效的关键途径。例如, 表面活性剂的复配有助于构筑在高温高盐条件下仍保持稳定的高强度界面膜; 纳米材料复配则可通过改性纳米颗粒作为物理交联点, 增强体系的力学稳定性与耐温抗盐性能; 而功能一体化复配进一步推动多种性能的有机整合。基于表 1 结果, 采用添加剂复配策略构建纳米纤维掺杂的复合型聚合物, 或可为显著提升材料在高温高盐环境中的适应性与稳定性提供更具潜力的方向。

4. 纳米纤维素/聚合物复合驱油体系的构建机理探讨

4.1. 纳米纤维素(NC)在驱油体系中的应用实例

NC 在驱油领域已展示出良好潜力:

NC 分散液: 功能化 CNF (如 NC-KYSS) 在高盐条件下仍保持稳定分散, 并可通过 “log-jamming” 机制选择性封堵高渗通道, 驱动后续流体转向低渗区, 从而提高波及效率[16]。

NC 高稳泡沫: CNF 与表面活性剂复配可在泡沫液膜界面形成粘弹性界面层, 可显著延长泡沫半衰期, 使其在高温高盐环境条件下仍保持稳定。

NC 增强凝胶：以 NC 为骨架的水凝胶表现出优异的力学强度和耐温耐盐性，可作为调驱体系用于非均质油藏调驱。

4.2. 纳米纤维素的复配优势

纳米纤维素主要包括纤维素纳米晶体(CNC)与纤维素纳米纤丝(CNF)，因其独特的纳米尺度效应与可修饰性，被认为是提升驱油体系耐温耐盐性能的理想复配材料。纳米材料兼具优异的物理、化学性能与特殊功能特性：其尺寸小、比表面积大，原子间结合力强，能显著提升复合材料的强度和模量，部分还可改善聚合物基体的导热导电性能；表面原子比例高、不饱和性与活性强，在催化等领域表现出高化学活性和选择性；同时具备磁学、光学等特殊性能，粒径细小使其分散性好、团聚少，便于复合操作，且表面易改性，为功能化设计提供了更多可能性。

4.3. 纳米纤维素与聚合物的复配机理探讨

CNF 与聚丙烯酰胺复配可通过多重协同作用增强体系性能：

- 1) 纳米增强与物理交联：CNF 作为刚性纳米单元限制聚合物链热运动，提升热稳定性。
- 2) 氢键与静电稳定：CNF 表面羧基与聚合物极性基团形成氢键网络；其表面电荷提供静电斥力，维持高盐下的分散稳定性[17]。
- 3) 功能协同：通过对 CNF 进行疏水或温敏改性，可赋予体系智能响应特性，增强环境适应性。

综上，纳米纤维素凭借其结构与性能优势，为构建高性能耐温耐盐驱油体系提供了可行的材料基础与技术路径。未来研究可聚焦于其低成本制备、精准改性及与聚合物的复配工艺优化。在复配体系的研制过程中，很多学者选择用纳米材料作为复配添加剂使用，这是因为纳米材料具有独特的尺寸效应和表面特性。

5. 结语

高温高盐油藏开发对驱油剂性能提出了更高要求。本文综述了耐温耐盐聚合物驱油剂的研究进展，系统梳理了凝胶体系、聚合物改性、复配技术等方向的关键成果，并探讨了纳米纤维素等新材料在提升体系耐温抗盐性能中的作用机制。总体而言，通过分子设计、结构调控与复合增效等多层次策略，驱油剂在苛刻油藏条件下的适应性与稳定性已取得显著提升。未来研究应进一步推动低成本、多功能、智能响应型驱油体系的开发，以支撑复杂油藏的高效开发与采收率提升。

基金项目

国家级大学生创新训练计划项目(项目编号：202510078029)，河南省大学生创新训练计划项目(项目编号：2024XA045)。

参考文献

- [1] 曹绪龙, 季岩峰, 祝仰文, 等. 聚合物驱研究进展及技术展望[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(6): 8-16.
- [2] 李美杰, 闫成双, 薛宪波, 等. 耐温抗盐类聚合物驱研究现状及展望[J]. 石油化工应用, 2024, 39(2): 11-16.
- [3] 刘旭超, 刘长龙, 赵文森, 等. 高温高盐碳酸盐油藏弱凝胶调驱体系实验研究[J]. 石油化工应用, 2019, 38(2): 34-40.
- [4] 贺伟中, 曲国辉, 李博文, 等. 耐温耐盐聚合物弱凝胶体系制备及性能评价[J]. 油田化学, 2023, 40(3): 408-413.
- [5] 谢维伟, 刘娜, 黄河, 等. 耐高温高盐复合冻胶堵水剂的制备及性能[J]. 石油化工, 2022, 51(10): 1218-1224.
- [6] 李海营, 梁涛, 刘晓平, 等. 高温高盐油藏化学堵水技术[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(5): 50-52.

-
- [7] 辛寅昌, 邱增中, 张盛军, 等. α -烯基聚醚磺酸盐的耐盐性能及应用[J]. 化工学报, 2008, 59(11): 2935-2940.
- [8] 王志鹏, 邹丽, 席伟安, 等. 耐温抗盐交联聚合物研制及现场试验[J]. 西部探矿工程, 2003, 15(10): 72-73.
- [9] 宋龙飞, 葛际江, 吴昊, 等. 耐温耐盐交联聚合物颗粒的制备与评价[J]. 油田化学, 2019, 36(3): 415-421.
- [10] 张小鑫, 赖小娟, 唐梅荣, 等. 耐温抗盐乳液型压裂液稠化剂的制备及性能[J]. 应用化工, 2022, 51(2): 455-459.
- [11] 张艳辉, 陈维余, 罗昌华, 等. 耐温耐盐乳液聚合物冻胶在线调驱体系研制[J]. 精细石油化工, 2020, 37(3): 28-32.
- [12] 孟庆阳, 陈捷, 赵甜静, 等. 高温高盐条件下 APG-LC 复配体系的泡沫性能与界面张力[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2013, 19(4): 437-440.
- [13] 李兆敏, 侯大炜, 鹿腾, 等. 疏水型 SiO₂ 纳米颗粒稳定泡沫机理与泡沫耐温性能评价[J]. 油田化学, 2019, 36(3): 494-500.
- [14] 李宗蔓, 陈世军, 马锐, 等. 新型耐温耐盐缓蚀泡排剂的研究[J]. 化工技术与开发, 2024, 53(12): 13-18.
- [15] 王翔, 郭继香, 王文昌, 等. 耐温耐盐暂堵化学桥塞体系研究与性能评价[J]. 应用化工, 2021, 50(6): 1457-1462.
- [16] 魏兵, 田庆涛, 毛润雪, 等. 纳米纤维素材料在油气田开发中的应用与展望[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(2): 98-104.
- [17] 杨开吉, 刘俊军, 张辉, 等. 纳米纤维素在石油开采中的应用研究进展[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(10): 5-11.