



# 第七届

## 化学驱提高采收率技术年会 论文集 [上册]

张方礼 主编

石油工业出版社

# 第七届化学驱提高采收率 技术年会论文集 (上册)

张方礼 主编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书是中国石油学会石油工程专业委员会主办的“第七届化学驱提高采收率技术年会”的汇编论文集。本论文集主要包括化学驱驱油机理和渗流规律研究、化学驱油剂的研制及工业生产技术、化学驱油藏工程优化设计技术、化学驱注采和地面工艺技术、化学驱技术现场应用及效果评价、化学驱提高采收率新技术、微生物提高采收率技术等内容。

本书可供从事化学驱提高采收率研究工作的科研人员、管理干部及大专院校师生参考使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

第七届化学驱提高采收率技术年会论文集：全2册 /  
张方礼主编. — 北京：石油工业出版社，2018.1  
ISBN 978-7-5183-2270-1

I. ①第… II. ①张… III. ①化学驱油-采收率 (油  
气开采) -学术会议-文集 IV. ①TE357-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 282478 号

---

出版发行：石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址：www.petropub.com

编辑部：(010) 64523712

图书营销中心：(010) 64523633

经 销：全国新华书店

印 刷：北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：69.75

字数：1764 千字

---

定价：336.00 元 (全两册)

(如发现印装质量问题，我社图书营销中心负责调换)

版权所有，翻印必究

# 《第七届化学驱提高采收率技术年会论文集》

## 编 委 会

主 编：张方礼

副 主 编：廖广志 马德胜 于天忠

编 委：（按姓氏笔画排序）

王正茂 王正波 王红庄 王连刚 王 强

尹万泉 丛苏男 朱国金 刘卫东 刘先贵

孙灵辉 张忠林 张 健 武 毅 胡海燕

徐文江 高永荣 高瑞民 唐 磊 曹绪龙

潘 庆

# 前 言

近年来以聚合物驱、二元复合驱、三元复合驱为代表的化学驱提高采收率技术在国内快速发展，在中国石油内部，纵向上已经从大庆油田一类油藏发展到二类、三类油藏，横向上从大庆油田发展到辽河、新疆、大港、长庆等其他油田。中国石化、中国海油的化学驱技术也已经从矿场试验走向工业化推广。2016年全国化学驱产量2000万吨左右，为保持国内原油稳产做出了突出贡献。中国陆上已开发油田提高采收率第二次潜力评价及发展战略研究结果表明，全国适合化学驱资源67亿吨，随着油田开发进入高含水、特高含水期，化学驱技术的优势越发突出，应用潜力越来越大，技术前景广阔。

聚合物/表面活性剂二元复合驱矿场试验表明，该技术具有“高效、低成本、绿色”的特点，是低油价下“双高”油藏开发中后期转换开发方式实现效益开发的现实途径。2009年，中国石油勘探与生产分公司组织召开了首届聚合物/表面活性剂二元复合驱技术研讨会，其后又召开了三次中国石油二元复合驱技术研讨会和两次中国石油二元复合驱工作会，共有180余篇论文进行了大会交流。2014年，从地质油藏、配方优化、钻采工程、地面工艺、经济评价五个方面优选出具有代表性的100余篇论文，集结成《聚合物/表面活性剂二元复合驱技术文集》出版。2015年，中国石油第六届化学驱提高采收率技术年会会议内容进行了一次大的调整，会议议题不再局限于聚合物/表面活性剂二元复合驱技术，而是涵盖了碱/表面活性剂/聚合物三元复合驱、聚合物/表面活性剂二元复合驱、聚合物驱、泡沫驱等相关领域，并出版了《中国石油第六届化学驱提高采收率技术年会论文集》。

2017年，根据形势需要，中国石油第七届化学驱提高采收率技术年会再次进行了大的调整，本着“开放、创新、交流、合作”的会议宗旨，会议面向国内所有油气田生产单位、科研院所和大专院校，由中国石油学会石油工程专业委员会、中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司、中国海洋石油总公司、陕西延长石油（集团）有限责任公司、油田化学剂专业标准化技术委员会共同主办。本次年会围绕化学驱驱油机理和渗流规律、驱油剂的研制及生产、油藏工程优化设计、注采和地面工艺技术、现场应用及效果评价、环境保护及评价、提高采收率新技术、微生物提高采收率等专题开展技术交流，共收到论文168篇，经专家审定，会议交流论文88篇。本论文集甄选录用论文135篇，涵盖国内化学驱机理研究、配方研制、油藏工程、采油工艺、地面工程、矿场试验和经济评价等方面，内容涉及中国中高渗透砂砾岩油藏、复杂断块油藏、中低渗透砂岩油藏、普通稠油油藏等化学驱提高采收率技术的最新进展和发展趋势，为低油价下中国化学驱提高采收率技术的转型升级提供了新思路、新途径。相信本次年会的召开和论文集的出版能为国内外相关领域的科研人员提供最新信息和应用进展，推动低油价下中国化学驱技术的创新和规模应用。

希望本书集结的论文对相关科技工作者和院校师生有一定的参考与借鉴作用，书中不妥之处敬请广大读者批评指正。

# 目 录

## 上册

### 第一篇 化学驱驱油机理和渗流规律研究

- “绿色”纳米液对油—水—固界面行为的影响及驱油机理研究  
..... 李沁芝 魏 兵 蒲万芬 李 昊 卢来明 (3)
- 两种石油酸的界面传质和乳化规律及对二元驱配方性能的影响  
..... 王 雨 陈叔生 斯绍雄 (11)
- 二元复合驱油体系影响因素研究  
..... 于天忠 包 玲 郭丽娜 侯力嘉 鲁印龙 蒋美忠 (20)
- 特高渗油藏聚/表复合驱油机理研究  
..... 肖传敏 于 涛 潘 庆 张艳芳 张艳娟 何少林 郭丽娜 赵 晔 (25)
- 中渗透油藏疏水缔合聚合物剪切特征研究 ..... 庄永涛 (34)
- 驱油体系乳化综合指数对提高采收率的影响  
..... 栾和鑫 陈叔生 陈 静 向湘兴 程志强 张国山 (41)
- ASP 三元复合前置段塞与驱油效果关系实验研究  
..... 杜春泽 刘卫东 孙灵辉 陈思智 (47)
- 大庆二类薄差油层聚合物驱优化实验研究  
..... 田 浩 刘卫东 孙灵辉 陈思智 闫福丽 杨 烨 (53)
- 低温特低渗油藏空气泡沫驱油技术实验研究  
..... 康宵瑜 申哲娜 张忠林 薛 媛 王蓓蕾 (62)
- 多孔介质中二元复合体系乳化前后流动规律变化研究  
..... 刘哲宇 李宜强 庄永涛 陈一航 马瑞程 (71)
- 基于孔隙网络模拟的聚合物驱微观机理及开发效果研究..... 张贤松 唐恩高 谢晓庆 (80)
- 聚/表二元复合驱渗流机理研究 ..... 丛苏男 刘卫东 杨 烨 (87)
- 可视可量化微观模型缔合聚合物渗流及驱油特征研究  
..... 郭拥军 曹 苗 张新民 冯茹森 (92)
- 克拉玛依砾岩油藏污水配注聚—表二元复合驱微观渗流特征  
..... 吕建荣 聂振荣 张德富 徐崇军 (108)
- 孔隙级仿真模型微观剩余油动态分布实验研究 ..... 陈一航 李宜强 刘哲宇 赵聪 (117)
- 老君庙油田 L 油藏弱碱三元复合驱配方研究  
..... 黄 丽 罗文利 孙盈盈 邹新源 王正波 (123)
- 砾岩油藏水驱和聚合物驱微观驱替渗流机理研究  
..... 刘文涛 王晓光 陈玉琨 张 菁 廉桂辉 (129)

耐高温聚合物油藏配伍性评价研究 .....	郭艳 张燕 郝明耀 孙林涛 王熙	(136)
泡沫驱体系中稳泡剂在石英砂和玉门油砂的静态吸附规律研究 .....	周新宇 罗文利 张娟 卢望红 黄丽 卢道	(150)
膨润土/沥青质颗粒与石油磺酸盐配方体系提高油水乳状液稳定性的研究 .....	于朋 朱友益 田婧 李文军 樊剑 罗幼松	(155)
强发泡高稳定泡沫驱油参数优化实验研究 .....	罗文利 周新宇 林梅钦 杨宝平 黄丽 乔琦	(163)
柔性微凝胶水分散体系在多孔介质中的驱替机理 ...	吴行才 韩大匡 卢祥国 叶银珠	(174)
三元复合驱深度调剖物理模拟实验研究 .....	张世东 李庆松 王庆国 张丽梅	(186)
新疆砾岩油藏聚/表二元驱油体系提高采收率机理研究 .....	张德富 陈丽华 罗刚 汪玉华	(195)
优化驱油体系黏度对改善普通稠油油藏驱油效果实验研究 .....	郭丽娜	(208)
聚合物吸附对乳化驱油影响及试验效果评价研究 .....	宣英龙 杨建朋 吴凤琴	(216)
二类油层二元、三元交替注入提高采收率研究及现场应用效果 .....	杨雪白 宣英龙 徐薇薇	(226)

## 第二篇 化学驱油剂的研制及工业生产技术

聚合物驱原油破乳剂的研制 .....	马晓峰 韩丰泽 张玉敏 周新艳	(239)
海上速溶耐温抗盐聚丙烯酰胺的制备与性能研究 .....	李雷振 李元军 王欢 石昀 孙凤萍 刘存辉	(245)
高凝油油藏化学驱表面活性剂的筛选与评价 .....	郭斐 赵志彬 肖传敏 张向宇 苑光宇 李晓风 包玲 战洪浩	(256)
磺酸型甜菜碱表面活性剂的合成、表征及界面活性研究 .....	王立成 王旭生 梁晓静 王帅 郭勇	(264)
一种抗高盐超分子聚合物体系的研制及性能 .....	姜峰 蒲万芬 陈珮 汪若兰	(270)
渤海 B 油田调驱用乳液聚合物 RJ14 合成及性能研究 .....	王成胜 吴晓燕 高建崇 陈士佳 张润芳 吴雅丽 李娟	(277)
不同化学驱体系的分子结构及性能对比研究 .....	陈斌 王成胜 张洪 吴彬彬 左清泉 陈士佳 李奇	(285)
芥基乙二胺羟基丙磺酸钠的合成及其性能评价 .....	时昌新 孟庆春 宋社民 任红梅 王莉 柏洁	(293)
驱油用表面活性剂的电喷雾质谱分析 .....	王旭生 王立成 郭勇	(299)
深部调驱配方体系室内实验研究 .....	侯力嘉	(305)
石油磺酸盐活性物含量分析—从重量法到色谱法 .....	王帅 王磊 郭勇	(311)
提高采收率用含刚性基团两亲聚合物的制备及性能评价.....	陈明贵 金庭浩 陈登亚	(318)
提高采收率用化学驱油剂的开发及工业化生产 .....	胡玉国 赵东旭 张婧 石昀 王欢	(327)
延长油田特低渗油藏新型驱油剂研究进展 .....	王成俊 高瑞民 洪玲	(334)
窄馏分重烷基苯磺酸盐的相态研究 .....	田婧 朱友益 于朋 樊剑 罗幼松	(341)

### 第三篇 化学驱油藏工程优化设计技术

聚表复合驱开发规律及调控技术研究

..... 唐海龙 王奎斌 何少林 张舒琴 王楠 邱晓娇 (353)

大庆萨中开发区过渡带弱碱三元复合驱方案优化设计方法研究

..... 安然 朱焱 张友波 宋晓彬 (359)

七东、克下组砾岩油藏聚合物驱过程调剖技术研究

..... 李凯 向小玲 万青山 袁恩来 唐可 原风刚 (369)

不同油品类型油藏化学驱配方体系评价技术研究

..... 于涛 武毅 张向宇 苑光宇 曲波 郭斐 马静 侯力嘉 (380)

大庆油田二类油层非均质特征对强碱复合驱开发动态及效果的影响

..... 聂春林 么世椿 罗庆 李洁 王银 张丽娟 (392)

化学驱用聚合物参数的优化设计室内研究

..... 武毅 苑光宇 李亚文 包玲 李晓风 战洪浩 (398)

化学驱油藏工程优化设计研究

..... 杨灿 王奎斌 唐海龙 张艳芳 侯力嘉 张宏 (403)

聚合物驱后油藏强化泡沫驱参数优化设计

..... 张伊琳 张振平 梁丽梅 张连锋 王艳霞 赵春旭 (407)

长庆低渗透油藏聚合物注入性研究

..... 袁国伟 李兆国 杜朝锋 张晓斌 冯春艳 王丽莉 (414)

二类油层聚合物驱各阶段压力界限研究 ..... 师磊 (425)

分散胶粒径与岩心孔喉尺寸匹配关系研究 ..... 赵帅 蒲万芬 袁成东 梅子来 (432)

海上多层稠油聚合物驱交替注入增效技术研究

..... 未志杰 康晓东 刘玉洋 张健 王旭东 (438)

海上复杂河流相油田聚合物驱注入能力研究

..... 王记俊 周海燕 胡勇 石洪福 付蓉 (447)

海上油田聚合物驱流度控制差异化研究及应用

..... 瞿朝朝 张静 王立垒 刘玉娟 王欣然 徐豪飞 (453)

聚合物驱最优控制无梯度优化算法研究

..... 谢晓庆 康晓东 曾杨 王全 石爻 (459)

驱油体系交替注入对聚合物驱剖面返转的改善研究

..... 王姗姗 薛新生 康晓东 胡科 朱玥珺 张健 (467)

胜利油田化学驱数值模拟技术新进展 ..... 曹伟东 戴涛 (475)

早期注聚合物五点法井网密度的多目标优化研究

..... 廉黎明 王强 周炜 周明辉 史彦尧 张可 (484)

注聚合物井剖面返转油藏工程判识方法研究 ..... 曾杨 康晓东 唐恩高 谢晓庆 (493)

注溶剂改善 SAGD 开发效果数值模拟研究

..... 王大为 刘小鸿 张凤义 杜春晓 耿志刚 (501)

## 下册

### 第四篇 化学驱注采和地面工艺技术

- 新疆油田化学驱采油工艺技术研究与应用 ..... 贾 鹏 胡 松 赵 可 邱 桃 (513)
- 新疆油田化学驱产出液处理工艺技术研究与应用  
..... 赵美刚 冯捷茹 叶 洋 传 平 (523)
- 新疆油田砾岩油藏化学驱配制注入工艺技术研究与应用  
..... 丁明华 黎 武 赵美刚 肖 雄 (531)
- 聚合物低剪切配注器的研制与应用 ..... 王新世 杨佰阳 王 魁 (541)
- 注聚井堵塞机理及 APS 解堵剂性能评价 ..... 温栋良 陈 渊 高申领 严慧呈 (548)
- A 油田含聚污水配制稀释聚合物应用技术 ..... 姜丽丽 (553)
- 大庆油田三元复合驱采出水处理工艺技术 ..... 古文革 陈忠喜 赵秋实 徐德会 (559)
- 海上油田注聚井单管分层注聚测调新技术研究与应用  
..... 赵 鹏 张志熊 韩玉贵 肖丽华 苑玉静 宋 鑫 (568)
- 化学驱改善压裂施工效果实践及作用机理研究  
..... 卢祥国 韩大伟 谢 坤 潘 赫 王可昕 邓 璇 (575)
- 聚合物溶液配注系统内黏度变化规律新方法研究  
..... 苑玉静 刘义刚 韩玉贵 肖丽华 赵 鹏 宋 鑫 (585)
- 聚合物驱采出水中残余聚合物特性及分子聚集形态研究 ..... 徐炳涛 李学丰 (592)
- 利用微观孔隙结构指导聚合物驱压裂方案设计 ..... 孟 婧 (599)
- 马岭油田聚/表二元化学驱地面配制注入工艺技术研究  
..... 李 言 商永滨 王 斌 程忠钊 (605)
- 浅谈三元复合驱结垢解析与对策 ..... 陈 安 (610)
- 强碱三元复合驱全过程分注技术研究  
..... 刘崇江 宋兴良 李海成 王 晶 唐俊东 梁福民 (616)
- 油井注采出液中聚合物微球的定量检测研究 ..... 梁晓静 郭 勇 (622)

### 第五篇 化学驱技术现场应用及效果评价

- LH2500 新型抗盐聚合物提高采收率技术研究 ..... 王 鹤 杜 雪 张 冰 (633)
- 高温高压特低渗砂岩油藏氮气泡沫驱可行性研究与试验  
..... 何 帆 代 星 方正魁 宋文宇 米 翔 (640)
- 强非均质储层窜流方向识别与封堵技术研究  
..... 唐 可 罗 强 白 雷 原风刚 向小玲 李 凯 (649)
- 新疆油田复合驱驱油体系研究 ..... 李织宏 孟亚玲 聂小斌 陈权生 栾和鑫 (656)
- “二三结合”挖潜关键技术研究  
..... 王奎斌 武 毅 于天忠 张舒琴 唐海龙 孙安培 (664)
- 二类油层污水体系抗盐聚合物驱油技术研究及应用  
..... 邓庆军 王月英 阚春玲 曾红梅 (670)

强碱三元复合驱后微观剩余油和储层物性变化 .....	何金钢 (682)
楚 102 断块深部调驱现场实施配套技术研究及优化 ..... 李海涛 代 薇 李凤群 蒋 涛 毛艳玲 张 帅 (690)	
集成化跟踪监测技术在聚/表二元驱先导性试验中的应用 ..... 刘其成 张艳娟 张向宇 赵 晔 滕 倩 彭 旭 (699)	
水驱砂岩油藏化学驱潜力评价技术研究 ..... 杨 灿 温 静 张舒琴 邱晓娇 马 静 张 莺 (705)	
回注污水水质对高温油藏化学驱配方体系性能影响因素研究 ..... 刘其成 曲 波 郭 斐 张艳娟 郭丽娜 莫 生 (709)	
长庆油田三叠系储层多段塞复合调剖体系评价及现场应用 ..... 张晓斌 张宏强 张永强 张 康 熊维亮 李文宏 (715)	
渤海 J 油田聚/表二元驱见效特征及评价方法研究 ..... 王欣然 杨 静 闫建丽 宋洪亮 瞿朝朝 颜冠山 (727)	
渤海 S 稠油油田早期聚合物驱见效见聚规律及效果评价研究 ..... 张国浩 王 刚 邓景夫 刘 斌 孙召勃 张 伟 (739)	
渤海油田注聚井复合解堵体系的研究与应用 ..... 赵文森 张 健 崔盈贤 周际永 黄利平 (746)	
国外化学驱提高采收率研究新进展——以 IOR2016 和 IOR2017 为例 ..... 郭 虎 马瑞程 李宜强 (752)	
海上 Q 油田高黏度稠油水平井聚合物驱可行性探索 ..... 王旭东 梁 丹 王 华 何春百 (761)	
海上边底水稠油油藏聚合物微球调驱技术研究及应用 ..... 张运来 胡 勇 欧阳雨薇 何逸凡 章 威 张吉磊 (768)	
海上油田化学驱提高采收率技术研究与实践 ..... 李彦来 李云鹏 王 刚 杨 锁 张国浩 (778)	
海上油田聚合物驱后剩余油分布类型和规律研究 .....	唐恩高 康晓东 李保振 杨二龙 (784)
化学驱项目效益管控模式探讨 .....	刘 斌 许 艳 魏秀艳 雒桓晟 (790)
聚/表复合驱工业化试验精细动态调控的做法及认识 .....	郑晓松 李宝莹 周培杰 (801)
聚/表剂驱和聚/表二元驱的比较研究 .....	郭 虎 马瑞程 (807)
聚合物微球在延长油田特低渗油藏的研究与应用 .....	郭茂雷 杨永超 赵永攀 (818)
七东 <sub>1</sub> 区克下组砾岩油藏聚合物驱不同渗流介质开发规律及治理对策 ..... 朱桂芳 程宏杰 刘宝珍 张 菁 (825)	
七中区克下组砾岩油藏二元复合驱主要做法及认识 ..... 聂振荣 钱根葆 刘顺生 顾鸿君 陈丽华 (836)	
饶阳凹陷路 36 断块整体深部调驱效果评价方法研究 ..... 艾华川 何得海 冉爱华 李 平 房 萍 刘莉娜 (845)	
乳液表面活性剂提高采收率技术 .....	周 敏 马宝东 赵方剑 (854)
胜利油田二元复合驱提高采收率技术 .....	王红艳 郭淑凤 潘斌林 李宗阳 李菲菲 (866)
长庆油田聚合物微球深部调驱技术与矿场试验 ..... 贾玉琴 杨海恩 刘国光 饶天利 (875)	

## 第六篇 化学驱提高采收率新技术

- 氯化钠代替弱碱配制石油磺酸盐表面活性剂三元体系可行性研究 ..... 吴 昊 (883)
- 一类油层聚合物驱后复合调驱提高采收率技术方法研究 ..... 朱 焱 吴凤琴 (891)
- 渤海典型稠油油田热复合化学技术应用研究  
..... 杜春晓 张凤义 刘小鸿 王大为 吴婷婷 (897)
- 低矿化度水驱中油—水—固界面行为以及微观宏观驱油效率的定量描述  
..... 卢来明 魏 兵 蒲万芬 李沁芝 李 昊 (905)
- 低矿化度水注入控水增油新技术 ..... 冯于恬 陈华兴 刘义刚 白健华 赵顺超 (917)
- 非均相复合驱提高采收率技术 ..... 刘 煜 郭兰磊 陈晓彦 魏翠华 赵方剑 (925)
- 非均相调驱技术在海上油田的研究及应用  
..... 翁大丽 王成胜 吴晓燕 张润芳 刘文华 吴慎渠 朱成华 (932)
- 高温高盐油藏分散胶/表面活性剂耦合调驱体系及调驱特性 ..... 杨 洋 蒲万芬 (941)
- 聚合物驱后油层提高采收率驱油方法研究  
..... 曹瑞波 韩培慧 高淑玲 孙 刚 罗 锋 闫 伟 (950)
- 抗盐聚合物驱油体系筛选与应用 ..... 韩培慧 张 东 孙 刚 郭松林 曹瑞波 (957)
- 疏水缔合聚合物驱替稠油的可行性研究  
..... 张新民 郭拥军 刘 洋 曹 苗 王 捷 胡 俊 (964)
- 一种固体交联剂调剖堵水体系研究 ..... 孙 磊 张贵清 夏 烨 徐鸿志 郝志伟 (974)
- 黏弹性表面活性剂溶液用于海上油田化学驱提高采收率技术研究  
..... 韩玉贵 孟祥海 赵 鹏 苑玉静 王业飞 (981)

## 第七篇 微生物提高采收率技术

- 克拉玛依油田七中区微生物驱后产出液生化特性及流体性质变化  
..... 王红波 陈丽艳 连泽特 曹 强 代学成 李 明 马 挺 高配科 (989)
- 北一断东聚合物驱后储层内源微生物群落结构解析与激活体系评价  
..... 王洪卫 吴凤琴 (996)
- 复合微生物驱油技术研究 with 试验  
..... 朱秀雨 张立会 王龙飞 杨中建 何 佳 刘丽萍 (1002)
- 长庆油田微生物驱产出液菌群变化与增油效果分析  
..... 李红民 李文宏 李 晶 薛姝雯 陈富林 马艳玲 (1009)
- 赵凹油田微生物降黏、防蜡采油技术研究  
..... 郝春雷 王孟江 李飞鹏 常国栋 王 剑 (1017)
- 采油细菌对原油的趋向性运动及调控研究  
李 蔚 侯兆伟 李东翰 柏璐璐 刘 洋 王 蕊 张继元 窦绪谋 金 锐 (1026)
- 复合微生物菌种在延长低渗透油藏中的应用性能评价  
..... 高怡文 王成俊 薛 媛 赵 丽 金 志 (1033)
- 基于功能性激活剂体系的内源微生物驱油技术研究  
..... 刘 涛 李彩凤 高光军 宋永亭 曹嫣嫔 (1038)

生物表面活性剂的界面行为及同提高采收率间的关系研究

.....	丁明山	王 静	林军章	汪卫东	(1046)
微生物采油主要乳化功能菌研究 .....	马原栋	俞 理	崔庆锋	修建龙	王天源 (1052)
微生物方法提高石油采收率的原理及应用					
.....	许 颖	马德胜	王 强	魏小芳	周体尧 邹新源 (1061)
微生物驱油机理研究新进展 .....	吴晓玲	宋永亭	胡 婧	孙刚正	(1071)
厌氧微生物提高采收率技术研究 .....	林军章	冯 云	王 静	谭晓明	(1076)
原油降解菌的降解及驱油性能研究					
.....	孔丽萍	李彩凤	张 洪	吴雅丽	陈 斌 王成胜 (1081)

# 第一篇 化学驱驱油机理和 渗流规律研究



# “绿色”纳米液对油—水—固界面行为的影响及驱油机理研究

李沁芝 魏 兵 蒲万芬 李 昊 卢来明

(西南石油大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室)

**摘要:** 本文以天然高分子材料—纳米纤维素为基础,通过原位表面嫁接(grafting) AMPS 和疏水基团,制备具有表面活性的纳米液体系。通过研究纳米液的热力学性质,溶液黏度、流变性,纳米液对油—水—固界面行为的影响及在多孔介质中的流动行为,同时结合微观可视化实验,分析纳米液的动、静态行为,简述纳米液的驱油机理,并发掘其在提高采收率方向上的应用潜力。结果表明:本文中制备的纳米液具有较高的热稳定性,且耐盐性能和分散性有所提高;纳米液体系表现出黏弹性特征,质量分数为 0.3% 的纳米液黏度约为  $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;通过在岩石表面的“楔形”铺展,纳米液可以有效剥离岩石表面的油膜,反转岩石表面的润湿性。由于改性纳米纤维素的两性特征,纳米液可以有效降低油水间的界面张力至  $10^{-1}\text{mN/m}$ ,形成的乳液比较稳定。利用微观可视化模型模拟了纳米液在多孔介质中的流动规律,发现残余油能被乳化形成小油滴,增强剩余油的流动能力,同时可以堵塞一些小孔道导致液流转向,扩大波及体积。

**关键词:** 绿色; 纳米液; 提高采收率; 驱油机理

目前国内外很多水驱油田已进入了开发中后期,但是由于储层的非均质性及不利的流度比使水驱后的油层存在着大量的剩余油。化学驱一般被认为是一种有效的提高采收率技术,但是又存在着一些问题,例如聚合物的剪切稳定性差,给地面原油集输及处理带来了很多问题。针对目前三次采油中存在的问题,并结合目前各国对环境污染问题日益关注的发展趋势,迫切需要一种“绿色”的驱油体系。所以纤维素这种可持续发展的再生资源就得到了越来越多的重视<sup>[1-9]</sup>。因为纤维素独特的结构,使其具有特殊的流体力学及热力学性能,如较大的比表面积、纳米纤维素间的氢键作用使其形成了稳定的三维纳米网状结构、较好的生物适应性、良好的机械稳定性、较好的增稠效果等。目前纳米纤维素得到了越来越多的重视,在各个领域都得到了广泛的应用<sup>[10-20]</sup>,而如何进一步有效利用纳米纤维素资源,成为了国内外科学家竞相开展的研究课题。

因此,本文将其应用于提高采收率技术中,通过接枝改性的办法将活性基团嫁接在纳米纤维素分子上,制备了一种基于纳米纤维素的纳米液——“绿色”纳米液 NC-KYSS,并开展了该纳米液油—水—固界面行为的研究,包括纳米液的耐温、耐盐性质,岩石润湿反转现象,油水乳化现象,微观驱油实验等,从而揭示纳米液在岩心中的流动行为及驱油机理,为其在提高采收率中的应用提出理论依据和实验支撑。

# 1 实验部分

## 1.1 材料与仪器

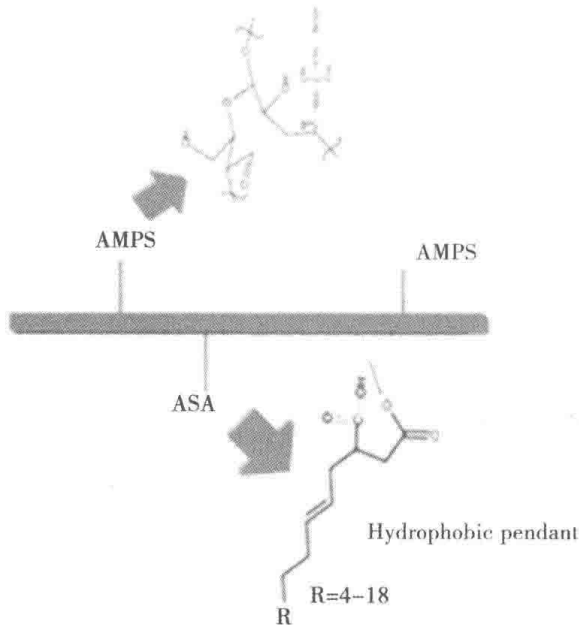


图1 NC-KYSS 的分子结构

材料：在 NFC（长度约为  $2\mu\text{m}$ ，直径约为  $10\sim 15\text{nm}$ ）表面嫁接 2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸（AMPS，质量分数为 99.9%）和疏水基团，制备纳米液 NC-KYSS（其分子结构如图 1 所示），浓度为 1% 的盐水。

仪器：Quanta 450 SEM 型环境扫描电子显微镜，DSC823 TGA/SDTA851e 型热分析仪（Mettler - Toledo Crop.，瑞士），Anton Par MCR 302 高温高压流变仪。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 纳米液的微观结构

取 1mL 纳米液 NC-KYSS 进行稀释，将稀释后的样品装入铜片网格中，放入 Quanta 450 SEM 型环境扫描电子显微镜装置中，在

氮气条件下观察。

### 1.2.2 纳米液的流变性

为避免其他因素的影响，分别用不同浓度的盐水配制质量分数为 0.3% 的纳米液 NC-KYSS。测定黏—温曲线时，温度变化从  $25^\circ\text{C}$  加温至  $90^\circ\text{C}$ ，升温速率约为  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ，剪切速率为  $10\text{s}^{-1}$ ；黏弹性测定时，扫描频率为  $0.1\sim 100\text{Hz}$ ，温度为  $25^\circ\text{C}$ 。

### 1.2.3 纳米液的乳化性

室温条件下，将浓度为  $0.2\%\sim 0.5\%$ （质量分数）的纳米液分别与原油以 9:1、8:2、7:3、4:6 的比例制备所需的乳状液，震荡 30s 后，观察油水的不同比例和纳米液浓度对乳状液稳定性的影响。

### 1.2.4 岩心的润湿性

将砂岩及碳酸盐岩岩心切成厚薄均匀的薄片，用蒸馏水冲洗表面残留的物质；将岩心片浸泡在原油中并放在  $100^\circ\text{C}$  的烘箱中老化；一周后取出冲洗，放入烘箱中烘干，测量原始接触角；再将其分别浸泡在纳米液中；一周后取出冲洗，放入烘箱中烘干，测量接触角。

### 1.2.5 微观驱替实验

采用光蚀玻璃孔隙模型，用 1% 的盐水配制浓度为 0.3%（质量分数）的纳米液 NC-KYSS。具体操作步骤为：将微观模型抽真空，向微观模型中饱和原油；先向微观模型中注入浓度为 1% 盐水，驱替原油至不出油后停止；再注入纳米液驱替残余油，用摄像机观察并记录各种渗流现象和整个驱替过程；再次注入盐水至不出油为止；分析图像，清洗模型，结束实验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纳米液的微观结构

从图 2 可以观察到表面修饰后的 NC-KYSS 的微观结构依然是纤维状, 同时因其官能团的作用, 形成了三维纳米网状结构, 使其性能更加稳定。

### 2.2 纳米液的稳定性

#### 2.2.1 纳米液的分散稳定性

纳米纤维素的比表面积较大, 表面的羟基较为丰富, 其每个葡萄糖分子都存在 3 个反应活化羟基 ( $C_2$ 、 $C_3$  及  $C_6$ ), 因此纳米纤维素容易通过氢键的作用而发生团聚, 并且很难通过物理办法来实现分散。此特性限制了其应用前景, 因此如何提高纳米纤维素的分散性应引起重视。大多数研究者通过加入表面活性剂或者化学接枝的办法来改善纳米纤维素的分散性。本文主要是通过通过在纳米纤维素表面嫁接 AMPS 和疏水基团, 制备具有表面活性的纳米液 NC-KYSS, 此时嫁接的基团可以增加分子间的排斥力, 从而改善纳米液的分散性。

通过观察和比较 NC-KYSS 的分散性随着时间的变化, 发现<sup>[21]</sup>纳米液在加入不同浓度的盐水后会有一定程度的聚沉, 并且其聚沉的速度和变化与放置时间、盐水浓度都有很大关系。而经过表面修饰后的纳米液 NC-KYSS 的分散性有所改善, 加入浓度分别为 1% 和 1.5% 的盐水后, NC-KYSS 能够在 30d 内均匀分散于盐水中。产生这种耐盐现象的主要原因是纳米纤维素分子间的疏水基团作用, 能够有效地改善纳米液的耐盐性能。

#### 2.2.2 纳米液的热稳定性

从 NC-KYSS 的 TGA/DTG 的曲线<sup>[21]</sup>可以观察到随着温度的升高, 纳米液的质量不断降低, 主要分为两个阶段: 第一个阶段是当温度从 25℃ 升高至 250℃ 时, 质量损失大约为 13%。因此这一阶段主要是因为水分的蒸发; 第二阶段是温度从 250℃ 升至 330℃, 质量大幅度损失, 约为 15%。当温度大于 300℃ 时, 热失重程度最大。从结果可以发现表面嫁接了 AMPS 和疏水基团的纳米液 NC-KYSS 的热稳定性有一定程度的提高。

### 2.3 纳米液的流变性

溶液的流变性能主要是研究溶液的流动及变形的性质。在多孔介质中, 孔道的直径存在较大的差异, 当注入体系时, 驱替液的流动速度时快时慢, 故溶液的流变性能不可忽视。当注入体系在多孔介质中流动时, 溶液的流变性发挥了重要的作用, 它能改善驱替前缘的流度比, “拉”、“拽”出残余油。一般来说, 具有黏弹性的注入体系有垂直于油水界面, 克服残余油的毛细管力的作用, 也有平行于油水界面, 形成驱动残余油的拖动力的作用。

通过比较研究纳米液在不同条件下的黏度和黏弹性的变化<sup>[9]</sup> (不同盐水浓度、不同温度) 可以发现, 黏度随着剪切速率的升高而减小, 表现出剪切稀释的现象。随着剪切力的

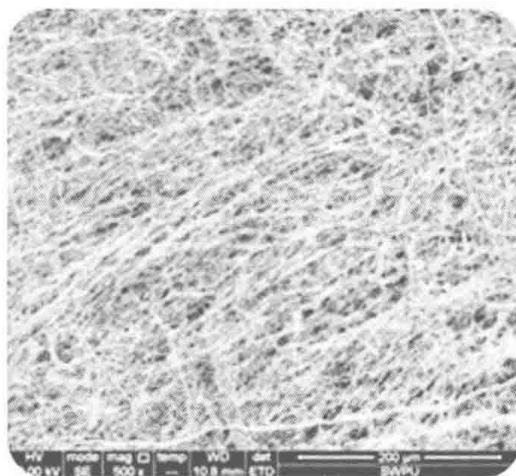


图 2 NC-KYSS 的 SEM 图 (500X)