

聚合物—表面活性剂 复合驱油技术

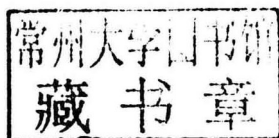
POLYMER—SURFACTANT COMBINATION FLOODING FOR
ENHANCED OIL RECOVERY

刘卫东 胡海燕 王正茂 丛苏男 孙灵辉 王红庄 等著

石油工业出版社

聚合物—表面活性剂 复合驱油技术

刘卫东 胡海燕 王正茂 丛苏男 孙灵辉 王红庄 等著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书以聚合物—表面活性剂复合驱技术研究为重点,从驱油机理、配方设计、油水界面作用、液固界面作用、油藏工程、数值模拟等方面对聚合物—表面活性剂复合驱技术进行了论述,并详细总结剖析了开发试验情况及目前存在的问题。

本书可供从事石油开发研究人员、提高采收率技术人员及石油院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

聚合物—表面活性剂复合驱油技术 / 刘卫东等
著. — 北京: 石油工业出版社, 2018. 1
ISBN 978-7-5183-2303-6

I. ①聚… II. ①刘… III. ①聚合物—
表面活性剂—复合驱—研究 IV. ①TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 287261 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) 64523710

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: 18.75

字数: 480 千字

定价: 138.00 元

(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

序

化学驱提高石油采收率的理论和技术，特别是聚合物驱和三元复合驱的理论和技术在中国获得很大的创新和发展。中国的聚合物驱和三元复合驱技术能够大幅度的提高石油采收率而且已经获得了大规模的工业化应用，为我国油田开发工业的发展做出了巨大贡献。聚合物—表面活性剂复合驱技术提高采收率幅度一般居聚合物驱和三元复合驱之间，是一种相对高效、低成本、绿色的提高采收率技术。

《聚合物—表面活性剂复合驱油技术》专著是作者在近几年来完成的国家油气重大专项、中国石油集团公司重大专项、中国石油股份公司项目等科学研究技术开发项目成果的总结提炼的基础上，并结合国内外近期发表的相关成果写著完成的。该专著涉及的聚合物—表面活性剂二元复合驱科技成果已成功地应用于新疆油田、辽河油田、大港油田和长庆油田的现场试验。

该专著内容主要包括聚合物—表面活性剂复合驱油剂体系、聚合物—表面活性剂复合驱油机理、聚合物—表面活性剂复合体系与原油界面作用、聚合物—表面活性剂复合体系与岩石矿物相互作用、聚合物—表面活性剂驱油藏工程方法及参数优化、聚合物—表面活性剂驱数值模拟技术、聚合物—表面活性剂驱矿场试验和应用。

该专著适于油田开发专业领域特别是涉及提高原油采收率工作的科研人员、院校师生以及油田现场科技人员和管理人员阅读参考。



2017年12月，北京

前 言

自 2005 年设立重大开发试验以来,中国石油重点在化学驱、热采、水驱等方面开展提高采收率的攻关研究和试验工作。随着表面活性剂合成和生产技术的进步,表面活性剂的性能得到极大提高,在碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱的基础上去掉碱后油水界面张力仍能够达到 10^{-3} mN/m 数量级,满足复合驱对表面活性剂的技术要求,因此中国石油自 2007 年开始陆续开展聚合物—表面活性剂复合驱重大开发试验。试验区涵盖高渗砂岩油藏、砾岩油藏、复杂断块油藏和中低渗透油藏,所使用的表面活性剂有阴离子表面活性剂、非离子表面活性剂、复合离子表面活性剂、复配表面活性剂等,经过技术攻关和矿场试验,聚合物—表面活性剂复合驱技术已经基本成熟,初步形成了系列配套技术,基本具备了工业化推广的条件。

《聚合物—表面活性剂复合驱油技术》以聚合物—表面活性剂复合驱技术研究为重点,从配方设计、驱油机理、油水界面作用、液固界面作用、油藏工程、数值模拟等方面进行了详细论述,全书共分为八章。第一章论述了化学驱的现状、聚合物—表面活性剂复合驱技术特点和矿场试验进展等;第二章论述了复合驱用表面活性剂类型、生产工艺、评价方法,复合驱用聚合物的类型、合成方法、驱油用聚合物优化方法,复合体系注入界限主要研究了相对分子质量、浓度与油藏渗透率的匹配关系,复合驱油体系中聚合物—表面活性剂相互作用主要明确聚合物和表面活性剂相互影响等;第三章论述了聚合物—表面活性剂复合驱微观驱油机理、扩大波及体积机理以及渗流规律等;第四章论述了聚合物—表面活性剂复合体系与原油之间的 Marangoni 对流及其对自发乳化的影响、复合体系与原油的乳化机理等;第五章论述了油藏表面性能的实验方法、体系在单组分矿物、油砂上的吸附规律等;第六章论述了复合驱油藏工程方法以及注入参数的优化方法等;第七章论述了聚合物—表面活性剂复合驱数值模拟方法建立以及岩心参数的选取、计算实例等;第八章介绍了中国石油在高渗透砂岩油藏中低渗透砂岩油藏聚合物—表面活性剂复合驱重大开发试验情况及目前存在的问题。

《聚合物—表面活性剂复合驱油技术》第一章由胡海燕、王正茂、丛苏男等编写;第二章由刘卫东、朱友益、王洪关、严文翰等编写;第三章由刘卫东、时昌新、郭英等编写;第四章由王正波、崔斌、郭英、刘卫东等编写;第五章由许可、刘卫东、孙灵辉、丛苏男等编写。第六章由王红庄、顾鸿君、苟菲菲、罗莉涛等编写;第七章由苟菲菲、罗莉涛、王强、丛苏男等编写;第八章由王正茂、刘卫东、许长福、武毅、张杰、张永强等编写。全书由廖广志、刘先贵、马德胜等审阅并提出修改意见。

在本书的编写过程中得到了中国石油勘探开发研究院、新疆油田分公司勘探开发研究院、辽河油田分公司勘探开发研究院、大港油田分公司采油工艺研究院、吉林油田分公司勘探开发研究院、长庆油田分公司勘探开发研究院和石油工业出版社的大力支持,在此再次表示感谢。由于笔者水平及掌握的资料有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 化学驱发展现状	(1)
第二节 聚合物—表面活性剂复合驱技术特点	(7)
第二章 聚合物—表面活性剂复合驱配方	(10)
第一节 表面活性剂	(10)
第二节 聚合物	(20)
第三节 注入界限研究	(41)
第四节 聚合物、表面活性剂相互作用	(50)
第三章 聚合物—表面活性剂复合驱驱油机理	(57)
第一节 聚合物—表面活性剂复合体系微观驱油机理	(57)
第二节 扩大波及体积机理	(78)
第三节 渗流规律	(87)
第四章 聚合物—表面活性剂复合体系与原油界面作用	(95)
第一节 Marangoni 对流	(95)
第二节 复合体系与原油乳化作用机理	(110)
第五章 聚合物—表面活性剂复合体系与岩石矿物相互作用	(169)
第一节 储层界面性质	(170)
第二节 单组分矿物吸附规律	(186)
第三节 油砂吸附规律	(192)
第四节 砂砾岩油藏吸附模型	(204)
第六章 聚合物—表面活性剂复合驱油藏工程	(208)
第一节 油藏工程方法	(208)
第二节 注入参数优化	(225)
第七章 聚合物—表面活性剂复合驱数值模拟	(238)
第一节 复合驱油数学模型	(239)
第二节 数值模拟物性参数	(249)
第三节 复合驱数值模拟	(257)

第八章 聚合物—表面活性剂复合驱矿场试验..... (270)

第一节 重大开发试验概况..... (270)

第二节 高渗透砂岩油藏复合驱试验..... (271)

第三节 中低渗透砂岩油藏复合驱试验..... (277)

第四节 砾岩油藏复合驱试验..... (282)

第五节 存在主要问题..... (287)

参考文献..... (290)

第一章 绪 论

三次采油也称提高石油采收率，一般经过三次采油方法开采过的油田，其最终采收率可达到 50% 以上。在众多三次采油技术中，化学驱比较适合中国陆相沉积的非均质油藏，聚合物驱、碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱、聚合物—表面活性剂复合驱技术在中国应用范围广，技术比较成熟、提高采收率幅度大，已经进行工业化试验和规模推广应用，取得了较好的经济效益和社会效益。

聚合物驱油技术在国内的应用范围最广，提高采收率可以达到 10% 左右；碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱提高采收率的幅度大，使用强碱的三元复合驱提高采收率可以达到 20% 以上，弱碱体系可以达到 18% 以上，但是碱的存在使其应用受到一定的限制。聚合物—表面活性剂复合驱是近年来发展较快的一种提高采收率技术，聚合物使其具有较好的流度控制能力，提高了波及系数；表面活性剂可降低油水界面张力，有利于残余油的启动，因此聚合物—表面活性剂复合驱既可以扩大波及体积，同时又可以提高微观驱油效率，是聚合物驱和三元复合驱外一种大幅度提高采收率技术。聚合物—表面活性剂复合体系由于去掉了碱，具有更高的水油流度比，对于非均质性油藏有更好的适应性。聚合物—表面活性剂复合驱提高采收率的幅度介于聚合物驱和三元复合驱之间，一般可以提高采收率 15% 左右。如果配方选择适当，其驱油效果可与三元复合驱相当，同时彻底消除碱带来的结垢等一系列问题，因此聚合物—表面活性剂复合驱已经成为复合驱中最重要的研究和发展方向。

第一节 化学驱发展现状

聚合物驱、聚合物—表面活性剂复合驱和碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱是化学驱中最重要的提高采收率方法。聚合物驱虽然已经规模应用，但是其存在提高采收率幅度较小的问题；碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱在矿场试验和工业化应用中存在注入困难、乳化严重以及结垢等问题，在试验过程中综合调整工作量大、难度大。为了克服三元复合驱试验中存在的缺点，最大限度发挥化学剂在提高采收率中的作用，减少化学驱中存在的问题，降低综合调整的难度，近年来国内外发展了聚合物—表面活性剂复合驱技术，它是一种可以充分发挥表面活性剂和聚合物协同作用来提高原油采收率的强化采油方法。毛细管力是造成水驱油藏波及区滞留大量原油的主要因素，而毛细管力又是油水两相界面张力作用的结果，它抵消外部施加的黏滞力，使注入水与聚集的共生水只起到部分驱油作用。毛细管力使一部分原油圈闭在低渗层孔隙之中，聚合物—表面活性剂复合驱通过降低界面张力和提高注入水的黏滞力，可以降低毛细管压力，增大毛管数，从而提高采收率。聚合物—表面活性剂复合驱油体系的黏度明显高于同等条件下的碱—表面活性剂—聚合物三元复合体系，界面张力达到超低，且驱油效率较高。聚合物—表面活性剂二元复合体系



作为一种新的驱油方法，可以最大限度发挥聚合物的黏弹性和表面活性剂降低界面张力的作用。

一、化学驱发展历程

化学驱技术发展历程大致可以分为四个阶段：

第一阶段为 20 世纪 60 年代初至 70 年代，主要研究的体系是表面活性剂微乳液驱。基于 P. A. Winsor 研究微乳液机理时提出的三种相态，表面活性剂能够达到 Winsor-Ⅲ 相态时，形成微乳液体系，此时油水充分混合形成稳定的体系，驱油效率很高，但形成微乳液体系需要的表面活性剂浓度很高[一般为 3%~15% (质量分数)]，由于成本高没有得到现场应用。

第二阶段为 20 世纪 80 年代，主要研究碱驱、碱—聚合物驱、活性水驱。基于碱与酸性原油作用产生表面活性剂可以降低油水界面张力的机理，针对原油酸值较高的油藏进行碱水驱，同时由于聚合物驱的成功应用，开始尝试碱—聚合物复合驱的研究及矿场试验。

第三阶段为 20 世纪 90 年代，是复合驱发展最快的阶段，主要基于化学剂之间的协同作用，重点发展三元复合驱，采用低浓度高效活性剂，通过碱与表面活性剂的协同作用，使体系油水界面张力达到超低，同时依靠聚合物增加黏度作用扩大波及体积，大幅度提高石油采收率。表 1-1-1 简要列出了几种化学驱提高原油采收率的潜力，各种化学驱方法提高采收率幅度变化较大，碱水驱提高采收率幅度最小，仅为 2%~8%；碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱提高采收率幅度最大，可达 15%~25%。由于复合驱中各化学剂之间的协同作用，一方面使复合驱中化学剂的用量比单一化学剂驱大大减少(表面活性剂用量一般为 0.2%~0.6%)；另一方面复合驱通常比单一组分化学驱的采收率更高。从而使复合驱成为三次采油中经济有效地提高原油采收率的新方法。

表 1-1-1 几种化学驱提高采收率的潜力

化学驱提高采收率方法	提高采收率幅度, %
碱水驱	2~8
聚合物驱	7~15
碱—聚合物复合驱	10~18
表面活性剂驱	8~20
碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱	15~25
泡沫复合驱	10~20

目前采用的化学复合驱仅指碱、表面活性剂和聚合物三类化学剂驱为主的组合，它们可按不同的方式组合成各种复合驱，如图 1-1-1 所示。

第四阶段是进入 20 世纪以来逐渐发展起来的聚合物—表面活性剂复合驱。随着表面活性剂研发及合成技术的发展，化学驱用表面活性剂的性能得到极大的提高，原来要加入碱才能使油水界面张力降低到超低的三元复合体系去掉碱后，界面张力仍然能够保持超低，因此聚合物—表面活性剂复合驱得到了较快的发展。

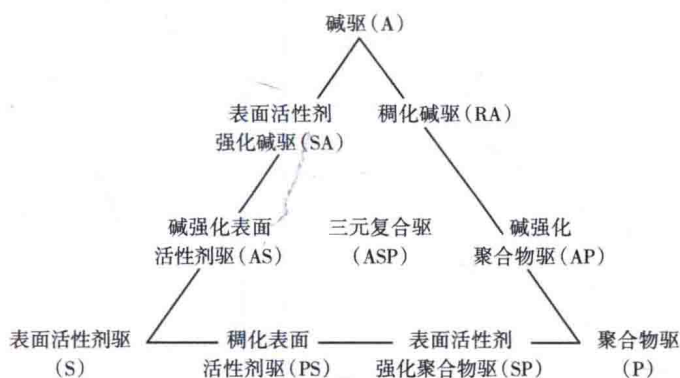


图 1-1-1 三种化学剂组合的复合驱种类

二、化学驱发展现状

1. 聚合物驱

聚合物驱油是 20 世纪 60 年代初发展起来的一项三次采油技术，其特点是向水中加入高相对分子质量的聚合物，从而使其黏度增加，改善驱替相与被驱替相间的流度比，扩大波及体积，进而提高原油采收率。由于其机理比较清楚、技术相对简单，世界各国开展技术研究和矿场试验比较早，美国于 20 世纪 50 年代末、60 年代初开展了室内研究，1964 年进行了矿场试验。1970 年以来，苏联、加拿大、英国、法国、罗马尼亚和德国等国家都迅速开展了聚合物驱矿场试验。从 20 世纪 60 年代至今，全世界有 200 多个油田或区块进行了聚合物驱试验。中国的大庆油田、胜利油田、大港油田、南阳油田、吉林油田、辽河油田和新疆油田等也相继开展了矿场先导试验及扩大工业试验。经过“七五”“八五”和“九五”期间的持续攻关，这一技术在中国取得了长足发展。聚合物已经形成系列产品，其驱油效果和驱替动态可以较准确的应用数值模拟进行预测，矿场试验已经取得明显效果，并形成配套技术。目前中国已经成为世界上使用聚合物驱油技术规模最大，大面积增产效果最好的国家，聚合物驱油技术成为中国石油持续高产稳产的重要技术措施。

大庆油田自 1972 年开始进行聚合物驱油矿场试验。大庆油田的油层特征是渗透率较高，油层温度较低（45℃），地层水的矿化度较低，基本满足聚合物驱油条件。在 1987—1988 年萨北地区现场试验的基础上，1990 年又在中西部地区开始试验，这些试验都获得了较高的经济效益，平均每吨聚合物增产原油 150t 以上。1996 年开始大规模工业化应用，逐步将聚合物驱油技术应用于整个油田，2002 年聚合物驱年产量突破 $1000 \times 10^4 \text{t}$ ，超过油田总产量的 20%，聚合物控制了含水的上升，减少了注水量，提升了大庆油田的总体开发水平。大庆油田聚合物驱以其规模大、技术含量高、经济效益好，创造了世界油田开发史上的奇迹。聚合物驱油技术已成为保持大庆油田持续高产及高含水后期提高油田开发水平的重要技术支撑。

大港油田从 1986 年开始对其主要油田港西四区进行聚合物驱油先导试验，试验历时约两年半，增产效果比较明显。试验前产量为 7t/d，到 1989 年中期，产量为 80t/d，增产效果达到 10 倍以上。平均含水也有大幅度下降。试验表明，经济效益较为显著，吨

聚合物增产原油 300t 以上。1991 年开始港西四区聚合物驱扩大试验, 试验历时 3 年, 扩大试验区日产油量从注聚合物前的 42.3t 增加到 80t, 综合含水从 92% 下降到 85.2%, 试验区累计增油 80112t, 吨聚合物增油 275t, 提高采收率 8.4%。在前期清水聚合物驱的基础上, 近年来大港油田主要在港西三区等开展污水聚合物驱工业化, 直至 2015 年底覆盖地质储量 $2058 \times 10^4 \text{t}$, 产油达到 $16 \times 10^4 \text{t}$ 。

胜利油田 1992 年开始在孤岛油田开展聚合物驱油先导试验。1994 年在孤岛和孤东油田开展了聚合物驱油扩大试验, 1997 年进行了工业推广应用, 得到了明显的降水增油效果。到 2012 年底共实施聚合物驱项目覆盖地质储量约 $3.14 \times 10^8 \text{t}$, 累计增油 $1700 \times 10^4 \text{t}$ 。同时形成了一套完善的高温高盐油藏条件下聚合物驱油配套技术, 主要包括室内聚合物产品筛选及配方研究技术、方案优化技术、数模跟踪预测技术、矿场实施跟踪评价技术等。

克拉玛依油田七东 1 区克下组砾岩油藏聚合物驱工业化试验自 2005 年开始, 经过室内机理配方研究、方案优化、矿场实施等, 到 2014 年底提高采收率 12% 以上, 中心井含水下降最大值 30.1%, 采油速度从前缘水驱的 0.49% 提高到采油高峰期的 3.5%, 吨聚合物增油 60t 左右, 内部收益率达到 30% 以上, 形成了一整套适合砾岩油藏聚合物驱的配套技术。七东 1 区克下组砾岩油藏 $30 \times 10^4 \text{t}$ 聚合物驱工业化应用正在展开, 预计提高采收率 11.7%。

中国陆相沉积油田的聚合物驱技术在大庆油田、胜利油田、大港油田以及其他油田规模应用的基础上, 目前已经提出了聚合物驱适应的油藏条件, 实现了理论上、认识上的飞跃。目前, 各大油田聚合物驱的研究方向大多放在新型廉价质优的聚合物研究上, 如疏水缔合聚合物、改性聚丙烯酰胺等。相信在不久的将来, 聚合物驱技术的应用范围将会越来越广。

2. 碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱

碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱是 20 世纪 80 年代初国外出现的化学驱新技术。三元复合驱体系是从二元复合驱体系(胶束—聚合物、表面活性剂—聚合物、碱—聚合物)发展而来的。由于胶束—聚合物驱在驱油体系驱扫过的地区几乎 100% 的原油被有效驱替出来, 所以 20 世纪 80 年代, 胶束—聚合物驱无论在实验室研究还是在矿场试验中都受到了人们的普遍重视。大庆油田最先开展了表面活性剂—聚合物和胶束—聚合物驱先导性矿场试验, 取得了非常好的技术效果。但是由于经济上的原因, 当时这种提高采收率的方法没有发展到商业应用的规模。胶束—聚合物驱到 20 世纪 90 年代还不能广泛应用, 妨碍其商业化的一个主要问题是驱替体系中的表面活性剂和助剂的成本太高(表面活性剂浓度高达 5%~10%)。而采用碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱体系的主要目的是用廉价的碱剂来代替价格较昂贵的表面活性剂, 降低复合驱的药剂成本。

20 世纪 80 年代初, 国外开始了三元复合体系驱油研究, 其中美国 Sertek 公司在 West Kiehl Unit 油田进行的三元复合驱矿场试验, Shell 石油公司也进行了同类矿场试验, 三元复合驱技术研究取得了重要进展。三元复合体系中表面活性剂的浓度一般为 0.2%~0.5%, 碱的加入降低了表面活性剂的吸附损失, 大约可降低到原来的 1/5。此方法原理是碱与原油中的有机酸反应生成石油酸皂, 石油酸皂与加入的表面活性剂产生协同效应、碱与表面活性剂产生协同效应共同降低油水界面张力, 同时聚合物发挥流度控制的作用, 三种化学剂的综合作用提高了采收率。基于这一原理, 三元复合驱对于高酸值原油的油藏是一种潜力巨大的化学驱方法。已开展高酸值原油的三元复合驱先导性矿场试验见到了较好的驱油

效果。对于低酸值原油油藏,筛选出适合三元复合驱的高效表面活性剂的难度较大。

1993年 Barrett Resources 公司子公司 Plains 石油经营公司在位于怀俄明州 Crook 县的 Cambridge Minnelusa 油田开展了三元复合驱矿场试验,体系配方为 1.25% (质量分数) Na_2CO_3 + 0.1% (质量分数) B-100 + 1475 mg/L Alcoflood 1175A。三元复合体系段塞注入顺序是 0.39PV 碱—表面活性剂—聚合物三元复合段塞,后续 0.25PV 聚合物保护段塞,再后续水驱至经济界限。该试验区于 1993 年 2 月开始注入三元复合体系溶液。1996 年 10 月开始注入聚合物溶液。1999 年 7 月开始后续水驱。Cambridge 油田三元复合驱最终采收率为波及区的 60.9% (OOIP)^①,而数值模拟预测水驱采收率只有 34.1% (OOIP),三元复合驱较水驱提高采收率 26.8% (OOIP)。

中国三元复合驱的研究和矿场试验主要在大庆油田,1988 年开始进行三元复合驱的室内研究,当时主要是进行配方的筛选、驱油效率评价和驱油机理的研究。1993 年开始使用进口表面活性剂进行三元复合驱矿场试验。自 1994 年起,大庆油田先后在不同地区开展了 5 个三元复合驱先导性矿场试验,表面活性剂主要采用美国 OCT 公司产品(产品代号 B-100,ORS41)。1996 年开始扩大试验,试验结果表明大庆油田适合进行三元复合驱,提高采收率可以达到 20% 左右。但是当时存在三元复合驱成本较高的问题,主要原因是进口表面活性剂的成本较高,此外在三元复合驱试验中还需要进一步研究举升技术、清防垢技术以及采出液破乳技术等。针对进口表面活性剂矿场试验中存在的问题,在前期大量室内研究尤其是适合三元复合驱表面活性剂研究以及先导性试验取得成功的基础上,2000 年以来,大庆油田利用自主研发的重烷基苯磺酸盐表面活性剂产品(HABS)和石油磺酸盐产品(DPS)开展了更大规模的强碱、弱碱三元复合驱工业性矿场试验。三元复合驱由渗透率高、物性好的一类油层向渗透率中等的二类油层扩大应用。试验验证了三元复合驱的效果,国产表面活性剂三元复合体系提高采收率与进口表面活性剂体系相当,同时在试验中完善了三元复合驱的配套技术。大庆油田在室内研究和矿场试验的基础上,形成了以下 5 项技术:室内配方优化技术、现场注入方案优化技术、矿场实施及动态检测技术、采油工艺技术、地面工艺技术等。围绕实现“2010 年三元复合驱达到工业化生产技术条件”的工作目标,为三元复合驱工业推广应用做好技术准备,中国石油重大开发试验自 2005 年相继开展了北一区断东二类油层强碱体系三元复合驱矿场试验、北二区西部二类油层弱碱体系三元复合驱矿场试验和南五区一类油层强碱体系三元复合驱矿场试验,试验目的是验证大庆油田北部二类油层强碱、弱碱三元复合驱和南部一类油层强碱三元复合驱适用性,完善三元复合驱综合调整技术、采油工艺技术、油水井配套监测技术、地面配套工艺技术及采出液处理技术。到 2012 年底,北一区断东二类油层强碱体系三元复合驱重大开发试验阶段采出程度 34.67%,采收率提高 28.91 个百分点,综合含水最大降低 20%;北二区西部二类油层弱碱体系三元复合驱重大开发试验中心井区阶段采出程度 32.43%,提高采收率 26.59%,综合含水最大下降 19.06%;南五区一类油层强碱体系三元复合驱重大开发试验提高采收率 17% 以上,综合含水最大下降 21.1%,同时完善了三元复合驱油藏工程研究、钻井方案设计、井网井距优化、地面工程建设、采油过程优化、采出液破乳等系列配套技术。新疆油田在二中区北部采用石油磺酸盐(KPS)进行弱碱三元复合驱先导性矿场试

① OOIP: 原始石油地质储量。

验,小井距试验取得提高采收率 24.5% 的良好效果。

大庆油田三元复合驱现场试验取得了良好效果,主要体现在以下方面:

(1)采收率提高幅度大。强碱三元复合驱平均提高采收率 20% 以上,弱碱三元复合驱平均提高采收率 20%。

(2)形成了三元复合驱用化学剂生产体系,确保进入现场的表面活性剂、聚合物和碱等产品的质量达到要求。大庆炼化公司形成聚合物产业链,年产驱油用聚合物 $25 \times 10^4 \text{t}$ 。大庆东昊化工公司已经形成了年产重烷基苯磺酸盐表面活性剂 $5 \times 10^4 \text{t}$ 的生产能力,产品已经用于大庆油田三元复合驱现场试验和推广应用区块。大庆炼化公司建设了年产 $12 \times 10^4 \text{t}$ 的石油磺酸盐中试生产装置,石油磺酸盐产品满足弱碱三元复合体系在北二区西部二类油层矿场试验的需要。

(3)合理的注入方案设计和地面工程优化设计保证了现场试验效果。在三元复合驱矿场试验和工业化推广中形成了油藏工程方案、钻井设计方案、采油工程方案、地面建设方案的研究和设计技术。地面工程中采用点滴配注工艺流程、高压三元低压二元配注工艺流程等针对性配注技术,保证三元复合驱体系能经济有效地注入油藏。地面脱水系统保证三元复合驱采出液的处理基本达到要求,使试验得以正常进行。

(4)采油工艺不断完善。由于强碱三元复合驱结垢严重,对原油举升有一定影响。以陶瓷螺杆泵替代合金泵,同时添加防垢、阻垢化学剂,提高了防垢、阻垢能力,形成了适合三元复合驱的采油工艺技术。

大庆油田在三元复合驱试验和推广应用过程中逐步形成了系列配套技术,包括配方体系优化技术、层系组合及井网优化技术、油水井动态及采出化学剂变化规律预测技术、跟踪调整技术、采出液破乳与脱水技术、防垢技术、动态监测技术、经济评价技术等。

三元复合驱现场试验和推广应用中也暴露出一些问题,主要体现在:

(1)碱引起结垢、腐蚀,造成生产维护工作量大。强碱结垢使检泵周期大幅度缩短,采出液中碱含量高时出现此类现象,持续时间 1 年左右,虽然采取了物理防垢和化学防垢措施,使平均检泵周期从 100 天延长到 160 天左右,但仍比聚合物驱检泵周期缩短了一半,造成生产过程维护工作量大。

(2)采出液乳化严重,处理难度大、成本高。在南五区、北一断东试验区出现产出液乳化严重、油水分离困难的情况,导致电脱水器电场运行不平稳,跨电场次数多,外输油含水率多数超标,水中固体悬浮物含量超标。采出液中碱、表面活性剂含量高时出现此类现象,持续时间 3~5 个月,高峰期 1 个月左右。通过改进电脱水器电极,投加大量破乳剂、消泡剂,增加净水剂和强化水处理工艺,可以基本解决产出液破乳脱水问题,但处理成本较高。

3. 聚合物—表面活性剂复合驱

聚合物—表面活性剂复合驱技术是近年来发展起来的三次采油技术,它是一种可以充分发挥表面活性剂降低界面张力和聚合物提高波及体积协同作用来提高原油采收率的三次采油方法。很早以前人们就认识到毛细管力是造成水驱油藏波及区滞留大量原油的主要因素,而毛细管力又是油水两相界面张力作用的结果,它抵消外部施加的黏滞力,使注入水与聚集的共生水只起到部分驱油作用。毛细管力使一部分原油圈闭在低渗层孔隙之中,通过降低界面张力和提高注入水的黏度,可以降低毛细管压力,增大毛管数,从而提高采收

率。聚合物—表面活性剂复合驱既具有聚合物驱提高波及体积的功能,又具有三元复合驱提高驱油效率的作用,预计提高采收率 15% 左右,介于聚合物驱和三元复合驱之间,是一种对油藏伤害小、投入产出前景好、具有发展潜力的三次采油方法,具有良好应用前景。近年来聚合物—表面活性剂复合驱的快速发展得益于表面活性剂产品性能的改进以及新型表面活性剂产品的出现。20 世纪 80 年代,受表面活性剂与原油界面张力不能达到超低的限制,在复合驱的研究以及矿场试验中为了提高体系的驱油效率,在体系中加入碱,形成了目前应用的三元复合驱技术。表面活性剂性能的改进,在不加入碱的条件下聚合物—表面活性剂复合驱体系与原油的界面张力仍然能够达到超低,为化学驱的发展开辟了一条新的思路,即聚合物—表面活性剂复合驱。

中国石化胜利油田孤东七区西块 2003 年开始聚合物—表面活性剂复合驱试验。该试验区油层平均渗透率 1320mD,渗透率变异系数 0.58,孔隙度 34%,原始含油饱和度 72.0%,剩余油饱和度 45.5%,地下原油黏度 45mPa·s,是目前国内较为成功的聚合物—表面活性剂复合驱试验区。先导试验区日产油最高上升了 166t,含水下降 12.5%,提高采收率达 12% 以上。与孤东油田聚合物驱效果最好的单元相比,先导试验区的含水下降幅度、增油幅度均高于单一聚合物驱单元。

自 2008 年开始,中国石油加快了聚合物—表面活性剂复合驱重大开发试验的步伐,部署了五个区块的试验,即辽河油田锦 16 块、新疆油田七中区、吉林油田红 113 块、大庆油田马岭北三区、大港油田港西三区,这些试验区先后开展了井网层系、配方优化、注采方案、钻采工程、地面工程等有关工作。目前各区块都已经进入主段塞的注入阶段,取得了明显的降水增油效果。

辽河油田锦 16 块聚合物—表面活性剂复合驱工业化试验自 2006 年 12 月启动以来,先后完成了方案编制、地面工程建设、注采工艺配套、空白水驱等工作。2011 年 4 月正式转驱,同年 12 月开始注入主段塞。通过不断的跟踪调整,试验区日产油由转驱前 63t 上升到 2013 年 8 月的 300t 左右,到 2014 年 12 月仍然稳定在 289t,综合含水由 96.7% 下降到 83.1%,阶段产油 34×10^4 t,累计产油超万吨井 16 口,预计最终采收率可提高 18% 左右。

新疆油田七中区克下组油藏聚合物—表面活性剂复合驱工业化试验自 2007 年立项以来开展了大量实验研究及试验调整工作,因该区块存在物性较差、渗透率较低、非均质性严重等问题,试验初期注入的聚合物相对分子质量和浓度偏高,造成油井产液能力下降幅度大、剂窜严重。经过多次配方调整,2015 年 7 月试验整体达到见效高峰,呈“化学驱见效”特征。见效后产液量保持平稳,产油由 14.7t/d 上升至 42.0t/d,上升率 185.7%,含水由 86.6% 下降至 63.8%,降幅近 23 个百分点,与前缘水驱末对比,含水降幅超过 30 个百分点。试验阶段采出程度 17.3%,其中聚合物—表面活性剂复合驱阶段采出程度 9.3%,预计最终采收率可提高 15.3%。

第二节 聚合物—表面活性剂复合驱技术特点

聚合物驱主要利用聚合物的黏弹性,通过提高驱油效率和波及体积达到提高采收率的目的,提高采收率 10% 左右,幅度较小;三元复合驱主要利用聚合物的黏弹性以及表面活性剂和碱协同降低界面张力的特性,达到提高采收率的目的,是目前提高采收率幅度最大

的三次采油技术，强碱三元复合驱体系提高采收率 20% 以上，弱碱三元复合驱体系提高采收率 18% 左右，但是由于碱的存在使其应用受到一定的限制。近年来表面活性剂技术发展很快，原来必须加入碱后界面张力才能达到低（超低）的三元复合驱体系在去掉碱后也能够达到低（超低）；随着三次采油驱油理论的发展，聚合物的黏弹性在提高采收率中占有的地位越加重要，在高黏弹性条件下，适当提高油水界面张力也能达到较高的驱油效率。两者相结合使聚合物—表面活性剂复合驱提高采收率技术得到了较快发展。聚合物—表面活性剂复合驱提高采收率介于聚合物驱和三元复合驱之间，可提高采收率 15% 左右。聚合物—表面活性剂复合驱是目前三次采油技术的拓展，是聚合物驱和三元复合驱之外对三次采油技术的探索。

(1) 提高采收率幅度大，适用油藏条件范围宽。

聚合物—表面活性剂复合驱是在聚合物驱中加入表面活性剂，利用聚合物扩大波及体积能力以及表面活性剂降低界面张力能力，既增大了波及系数又提高了驱油效率，提高采收率能力大于聚合物驱。

聚合物—表面活性剂复合驱是聚合物驱和三元复合驱技术的拓展，从化学驱油藏筛选标准上分析，适合聚合物驱和三元复合驱的油藏基本都可以进行聚合物—表面活性剂复合驱。

(2) 属于无碱体系，减少岩石矿物溶蚀、井筒结垢、采出原油破乳困难等现象。

三元复合驱过程中，碱使油藏中的岩石矿物溶蚀，造成油藏中的颗粒运移堵塞孔道，如图 1-2-1 所示。溶蚀下来的离子与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子接触后产生沉淀，也对储层孔喉产生堵塞。井筒中不同层位的产出液混合后，由于溶液的稳定环境遭到破坏，井筒中离子发生反应、沉淀，造成井筒中结垢现象严重，缩短了油井的检泵周期，同时地面管线以及储罐也存在比较明显的结垢现象，影响了油田的正常生产。聚合物—表面活性剂复合驱中不

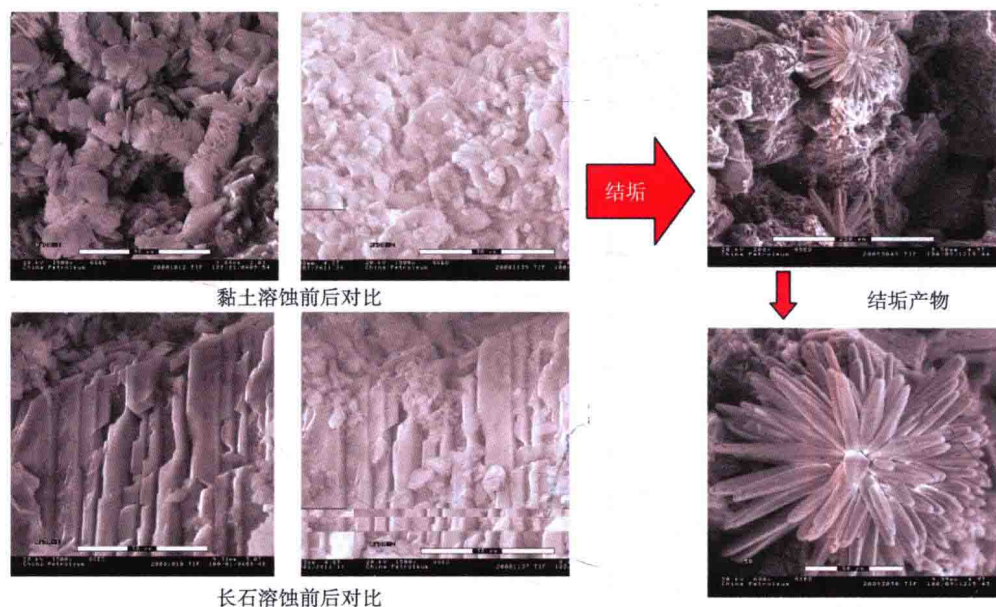


图 1-2-1 三元复合驱中碱对岩石矿物的溶蚀及结垢

加入碱,减少由于碱存在造成的油管及地面管线结垢引起的频繁作业。三元复合驱由于聚合物的增黏作用和碱的存在产生的乳化、结垢等的影响,注入压力上升明显,对油井的产液量影响较大;聚合物—表面活性剂复合驱中无碱,降低了乳化、结垢对注入压力和油井产液的影响,聚合物中加入表面活性剂后,能够降低聚合物驱注入压力,因此聚合物—表面活性剂复合驱的注入压力要比聚合物驱和三元复合驱压力小,油井产液量下降的幅度也小,如图1-2-2所示。

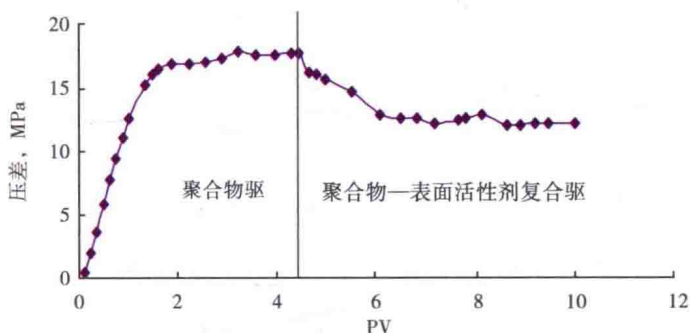


图1-2-2 聚合物—表面活性剂复合驱降低注入压力

(3)地面注入工艺简单,简化了注入流程和防腐处理。

聚合物—表面活性剂复合驱体系无碱,与三元复合驱相比减少了注入设备的数量;避免了对设备的腐蚀。聚合物—表面活性剂复合驱地面工程能够降低对设备的防腐、防垢的处理,简化了注入工艺和流程,降低了设备表面的处理难度。

(4)经济性较好,降低化学剂、设备和作业成本。

聚合物—表面活性剂复合驱中无碱,可以在保持体系黏度的条件下降低聚合物用量,从而降低化学剂成本;减少由于碱存在造成的频繁作业,降低作业成本;注入设备、管线简单,不需要防腐,降低设备投资;采出液破乳容易,降低了破乳剂的使用量,降低破乳成本。

(5)对表面活性剂要求更高,无碱条件界面张力达到超低更难。

与三元复合驱相比,聚合物—表面活性剂复合驱达到超低界面张力的难度更大,对表面活性剂的要求也更高;三元复合驱用表面活性剂在聚合物—表面活性剂复合驱中不一定能达到超低界面张力,需要进一步进行改性研究。目前专门针对聚合物—表面活性剂复合驱用表面活性剂的研制还处于起步阶段,单一类型的表面活性剂在聚合物—表面活性剂复合驱中油水界面张力很难达到超低,为了保证聚合物—表面活性剂复合驱效果,可采取两种甚至几种表面活性剂进行复配。但是目前复配所用的表面活性剂以非离子表面活性剂为主,对原油的乳化和洗油能力都比较弱,造成最终的采收率比较低,达不到预期效果。

第二章 聚合物—表面活性剂复合驱配方

由化学驱油机理可知，聚合物—表面活性剂复合驱提高采收率主要基于提高驱油效率和波及体积两种作用，表面活性剂的作用主要是降低油水界面张力、改变岩石润湿性、乳化原油，从而驱动岩石孔隙中的残余油，提高微观驱油效率；聚合物的主要作用是增加水溶液黏度，降低驱替液与油的流度比，提高波及效率。

第一节 表面活性剂

一、表面活性剂驱油机理

1. 降低油水界面张力机理

油水界面张力的降低可以很大程度上降低多孔介质对油滴的毛细围捕作用，降低原油与岩层间的黏附力，从而提高洗油效率。

2. 润湿反转机理

岩层的油湿性导致原油往往在岩层上铺展，原油与岩层间的黏附力较大，表面活性剂在岩层上的吸附，会改变岩层的润湿性，增加原油与岩层的接触角，降低原油与岩层间的黏附力，使原油更容易被水驱走因而提高了采收率。主要的过程如图 2-1-1 所示。

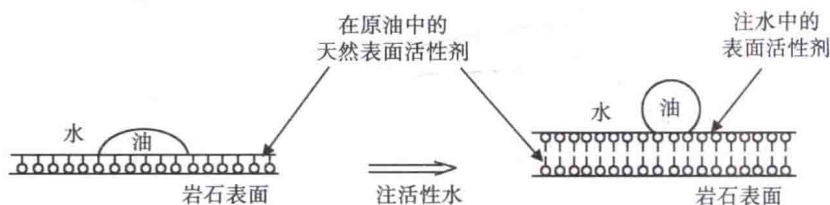


图 2-1-1 表面活性剂对岩石润湿性的改变过程

3. 乳化机理

表面活性剂对油的乳化，可以使原油形成乳状液分散在驱油体系中，然后被驱替液体携带至采油井，从而提高采收效率。

4. 提高表面电荷密度机理

表面活性剂吸附在油滴的表面和岩层上，由于带有同种电荷发生排斥作用使油滴不易重新与岩层相粘连，从而使原油更容易被携带运移。被驱出的油在向前运移时，彼此之间会发生碰撞，聚并。聚并到一定程度时就会形成油带。油带在向前推进时会聚并更多的油滴，结果油带不断扩大，最终被采出。此过程的示意图如图 2-1-2 所示。