



中国石油勘探开发研究院出版物

化学驱提高石油采收率技术 基础研究及应用

朱友益 侯庆铎 等著

石油工业出版社

化学驱提高石油采收率技术 基础研究及应用

朱友益 侯庆锋 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书收集了笔者及合作者从事化学驱技术研究工作 10 年来的主要研究成果, 内容包括化学驱技术研究进展、现状与发展方向, 驱油剂的研制与性能评价、复合驱配方优化, 化学驱油体系驱油机理, 化学驱技术现场试验与应用。可供从事三次采油技术, 特别是化学驱技术开发与应用工作的技术人员及有关院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化学驱提高石油采收率技术基础研究及应用 / 朱友益等著
北京: 石油工业出版社, 2013.12
ISBN 978-7-5021-9844-2

I. 化…

II. 朱…

III. 化学驱油 - 提高采收率 - 研究

IV. TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 258680 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 100011)
网 址: www.petropub.com.cn
发行部: (010) 64523620

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

2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 14.75
字数: 376 千字

定价: 65.00 元
(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)
版权所有, 翻印必究

前 言

当前和未来几十年，石油仍然是全球能源供应的主体组成部分。随着我国油田开发的不断深入，主力油田已经进入二次采油的后期阶段，水驱开发油田进入高含水、高产出程度的“双高”开发阶段，老油田原油产量呈现下降趋势。为了稳定我国油田原油产量，采用三次采油技术对三分之二传统采油技术难以有效开发的原油储量进一步开发，提高石油采收率已经越来越重要，三次采油提高采收率技术是油田开发中后期永恒的主题，化学驱提高采收率技术是三次采油的一种主要技术，化学驱技术的研究、试验与应用已经经历 30 多年，尤其是近十年来，化学驱提高采收率技术得到了快速发展。目前化学驱技术已经成为我国老油田三次采油提高采收率的主要技术。化学驱提高采收率技术主要包括聚合物驱、复合驱、泡沫驱等技术。

聚合物驱已经进入工业化应用阶段，成为我国三次采油提高原油产量的主体技术，目前已应用于大庆、新疆、辽河、胜利、大港等主力油田，油藏类型涉及整装砂岩、砾岩、复杂断块、中高温高盐油藏。原油年产量已经达到 $1000 \times 10^4 \text{t}$ 以上。聚合物驱的发展历程中伴随着新型高效聚合物产品的不断研制和升级，从常规高相对分子质量聚丙烯酰胺的研制到超高相对分子质量聚丙烯酰胺类聚合物的研发；从清水配制用高相对分子质量聚丙烯酰胺的研制到污水配制用耐盐聚合物的开发；从低温低盐油藏到高温高盐油藏用新型耐温抗盐聚合物的开发。产品开发初步形成系列化，为聚合驱技术在不同类型油藏推广应用奠定了基础。聚合物产品生产规模国内已经具备年产 $30 \times 10^4 \text{t}$ 的能力，确保了聚合物驱试验和扩大应用的需求。

化学复合驱技术先后经历了室内研究、先导性试验、工业化试验三个阶段。目前强碱三元复合驱进入工业化推广应用阶段，弱碱三元复合驱进入工业化试验阶段，无碱二元复合驱正在开展先导性试验。三元复合驱现场试验提高采收率幅度达到 19% ~ 25% 左右，是目前我国高含水老油田实施三次采油大幅度提高采收率的重要技术之一。伴随着复合驱技术发展的关键技术突破是新型驱油剂的研制、产品性能的不断优化和驱油体系的逐步完善。目前已经研制出适合强碱 ASP 复合驱的重烷基苯磺酸盐表面活性剂产品 HABS 和适合弱碱 ASP 复合驱的石油磺酸盐产品 DPS 等。这些产品已经成功应用于大庆油田三元复合驱现场试验，并且取得大幅度提高原油采收率的良好效果。但对适合各种类型油

藏的不同化学驱油体系的系列化驱油剂研发仍待加强。在化学复合驱配方体系优化,驱油机理研究方面也取得了长足进步,为复合驱技术在不同类型油藏应用提供指导。随着复合驱技术应用基础研究的不断深入,通过对复合驱存在的关键技术攻关和现场应用配套技术的完善,复合驱将取代聚合物驱成为中国石油三次采油化学驱提高采收率的主导技术。

泡沫驱油技术的研究与试验已经开展有 30 多年的历史。近年来通过不同气源、不同注入方式的泡沫驱室内研究与先导性试验,取得了一些新的认识 and 实践经验,同时试验中也暴露出许多问题。所以仍然需要加强应用基础研究,包括高效发泡剂研制、提高泡沫体系稳定性、使用低成本气源以及优化注入方式和现场配套技术等,使泡沫驱油技术不断完善。

本书收集了笔者及合作者从事化学驱技术研究工作 10 年来的主要研究成果,内容包括化学驱技术研究进展、现状与发展方向,驱油剂的研制与性能评价、复合驱配方优化,化学驱油体系驱油机理,化学驱技术现场试验与应用。记载了我们的研究历程,同时反映了在化学驱技术应用基础研究方面的进展。部分论文已经在石油勘探与开发等杂志刊登。可供从事三次采油技术,特别是化学驱技术开发与应用工作的技术人员及有关院校师生参考。

感谢国家专项(高含水油田提高采收率新技术 2011ZX05010)、国家 973 项目(大幅度提高石油采收率的基础研究 G1999022501,化学驱和微生物驱提高石油采收率的基础研究 2005CB221300)、中国石油天然气股份有限公司化学驱技术攻关项目对研究工作和出版本书的经费支持。感谢各论文合作者的支持。由于笔者水平有限,难免有不足和错误,敬请读者批评指正。

作 者

2013 年 6 月

目 录

第一部分 化学驱技术发展现状

中国化学驱提高采收率技术研究进展·····	朱友益	(3)
化学复合驱技术研究与应用现状及发展趋势·····	朱友益 侯庆锋 简国庆 马德胜	(16)
无碱表面活性剂—聚合物复合驱技术研究进展·····	朱友益 张 翼 刘卫东 侯庆锋	(27)

第二部分 驱油剂研制与配方优化

ASP 复合驱用烷基苯磺酸盐表面活性剂的合成·····	朱友益 沈平平 王 哲	(39)
三次采油用烷基苯磺酸盐结构与性能的关系研究·····	朱友益 沈平平 曲景奎 王国房	(45)
弱碱复合驱用烷基苯磺酸盐的研制·····	朱友益 沈平平 韩 冬 王红庄 王 哲	(51)
三元复合驱用取代苯磺酸盐的界面活性研究·····	朱友益 曲景奎	(57)
表面活性剂降低油水界面张力效率与效能的定义及应用·····	曲景奎 朱友益	(63)
弱碱复合驱用廉价高效石油磺酸盐研制·····	朱友益 罗治斌 袁 红 王 哲	(68)
驱油用烷基醇醚硫酸盐合成及界面活性研究·····	朱友益 杨常青	(74)
烷基聚氧丙烯醚磺酸盐合成及界面活性研究·····	朱友益 宁张磊 侯庆锋	(79)
烷基醇醚羧酸盐表面活性剂的合成与性能评价·····	陈淑艳 侯庆锋 朱友益	(85)
驱油用表面活性剂分子设计与合成·····	朱友益 王 哲 张 群	(94)
化学复合驱用表面活性剂研究进展·····	朱友益 雷 明	(103)
驱油用水溶性抗盐聚合物的研制与性能·····	朱友益 欧阳坚 罗文利	(112)
提高泡沫驱配方体系发泡稳定性研究·····	简国庆 陈淑艳 朱友益 侯庆锋	(120)

第三部分 化学流体行为与驱油机理研究

低浓度表面活性剂化学驱油体系驱油机理研究·····	朱友益 袁 红	(129)
SP 二元复合驱提高采收率的主要影响因素研究·····	朱友益 张 翼	(137)
原油组成对表面活性剂降低油水界面张力的影响·····	朱友益	(145)
液膜扩张黏弹性和体相泡沫稳定性研究·····	简国庆 侯庆锋 陈淑艳 朱友益	(151)
油对聚合物强化泡沫稳定性的影响·····	陈淑艳 简国庆 侯庆锋 朱友益	(165)

第四部分 化学驱技术油田现场试验与应用

ASP 三元复合驱现场试验进展与效果分析·····	朱友益 廖广志 刘卫东	(179)
SP 二元复合驱现场试验进展与效果分析·····	朱友益 宋新民 刘卫东	(187)
泡沫驱现场试验进展与效果分析·····	朱友益 翁 蕊 侯庆锋	(196)
碳酸盐岩油藏化学复合驱提高采收率研究·····	朱友益 王 哲 吴康云	(204)
砾岩油藏氮气泡沫驱提高采收率研究·····	侯庆锋 朱友益 翁 蕊 罗幼松	(215)
大庆油田聚合物驱后泡沫驱提高采收率研究·····	侯庆锋 朱友益 罗幼松 翁 蕊	(221)

第一部分

化学驱技术发展现状

中国化学驱提高采收率技术研究进展

朱友益

(提高石油采收率国家重点实验室, 中国石油勘探开发研究院)

摘 要: 中国开展化学驱提高采收率技术与现场试验已有 30 多年, 聚合物驱已经进入工业化应用阶段, 截至 2010 年, 中国石油已经进行了 50 多个聚合物工业化区块现场试验及应用, 取得了良好增油效果, 聚合物驱的产量已经达到 $1000 \times 10^4 \text{t/a}$; 化学复合驱已经完成 6 个三元复合驱现场先导性试验和 4 个工业化试验, 现场试验复合驱提高采收率幅度比水驱提高 20% 左右; 泡沫驱也已经开展先导性试验 10 多项, 大部分试验取得良好增油效果。本文主要总结聚合物驱技术试验与应用现状以及主要技术成果, 介绍了化学复合驱的研究发展历程、不同类型化学复合驱的特点和复合驱现场试验进展与效果, 简述了泡沫驱试验概况, 讨论化学驱技术面临的挑战和进一步发展的方向。

关键词: 聚合物驱 化学复合驱 泡沫驱 矿场试验 三次采油 采收率

我国油田形成于陆相沉积盆地, 油层非均质严重, 水驱开发地质储量约占已开发地质储量的 85% 以上, 注水开发油田主体已进入高含水、高采出程度的“双高”开发阶段, 高含水油田的原油产量占总产量的 60%。高含水油田一般又经历了数十年的开发历程, 剩余油分布总体上呈“高度分散、相对富集”的格局, 加上非均质油藏注水冲刷形成的优势渗流通道等不利因素, 导致部分油藏注水无效循环, 开发调整和挖潜难度越来越大, 提高这类油田的原油采收率已成为我国油田可持续发展和能源战略面临的新的挑战 and 机遇。

1999 年中国对陆上 17 个油区 200 多个油田进行的提高石油采收率潜力评价表明^[1], 我国三次采油潜力巨大, 可增加可采储量 $11.8 \times 10^8 \text{t}$ 。其中化学驱覆盖储量约 $60 \times 10^8 \text{t}$, 占三次采油技术覆盖储量的 77% (表 1), 是中国石油高含水油田提高石油采收率的主攻方向, 复合驱和聚合物驱增加可采储量最大, 占三次采油技术增加可采储量的 76%。因而发展应用化学驱技术资源有保障, 只要依靠技术不断创新, 解决化学驱存在的瓶颈技术, 能够实现到 2015 年化学驱年产原油稳定在 $1300 \times 10^4 \text{t}$ 的规划目标, 为中国石油原油产量稳定增长作出贡献。

随着提高采收率技术在中国的飞速发展, 国内逐渐形成了以聚合物驱为主导技术, 化学复合驱为重点接替技术的化学驱提高采收率技术路线。聚合物驱已经进入工业化应用阶段, 大庆油田已经进行 50 多个聚合物工业化区块现场试验应用, 取得了良好增油效果。三元复合驱已在大庆油田、胜利油田和新疆油田进行了现场先导性试验, 试验结果表明三元复合驱可以较大幅度提高采收率^[2]。大庆油田相继进行的 5 个三元复合驱先导性试验表明提高采收率 20% 以上, 在新疆克拉玛依油田砾岩油藏中进行的三元复合驱先导性试验也获得成功。在此基础上, 自 2000 年以来, 大庆油田利用自主研发的国产表面活性剂工业化产品开展 4 个三元驱工业性矿场试验, 目前也取得了大幅度提高采收率良好效果, 但试验中也暴露出一些问题亟待解决。至 2015 年, 随着化学复合驱瓶颈技术的攻克, 将逐步取代聚

合物驱技术成为中国石油三次采油大幅度提高原油采收率的主导技术。

国内泡沫驱技术的研究与试验也取得了长足进展。1994 年至 2010 年期间，中国已经开展的泡沫驱现场试验共计 18 个^[3]，大部分取得良好的增油效果，试验中也暴露出不少问题，正在不断加以改进。由于泡沫驱技术适应的油藏条件相对较宽，对于日益复杂的油藏开发条件，泡沫驱技术具有发展潜力。

本文主要总结聚合物驱技术试验与应用的效果及形成的十大配套技术成果；叙述化学复合驱的研究发展历程和不同类型化学复合驱的特点，介绍复合驱现场试验进展与效果；简述泡沫驱技术现场试验概况。同时讨论化学驱技术面临的挑战和技术进一步发展的方向。

表 1 中国石油提高石油采收率潜力评价结果

三次采油技术	覆盖储量 (10 ⁶ t)	提高采收率 (%)	增加可采储量 (10 ⁶ t)	增加可采储量比例 (%)
聚合物驱	2905	9.7	282	23.82
碱—聚合物复合驱 (AP 驱)	141	13.1	18	1.52
碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱 (ASP 驱)	3127	19.2	600	50.68
注气混相驱	525	18.2	95	8.02
注气非混相驱	702	8.7	61	5.15
热采	574	22.2	128	10.81
合计	7974		1184	100

1 聚合物驱试验与应用现状

国内自 1965 年开始进行聚合物驱技术室内研究，研究表明，通过在水中添加水溶性高分子聚合物来增加驱替液黏度，可改善油水流动度比，提高波及效率。1972 年大庆油田开展聚合物驱先导性试验，在葡 I 1-4 单层试验井组，试验区综合含水由 95.2% 降低到 79.4%，日产原油由 37t 上升到 149t，中心井聚合物驱比水驱提高采收率 14%，使产出程度达到 52.2%。在葡 I 1-4 和萨 II 1-3 双层开采试验井组，试验区综合含水由 95.7% 降低到 84.4%，日产原油由 86t 上升到 211t，中心井聚合物驱比水驱提高采收率 11.6%。在试验区钻密闭取心井证实，葡 I 1-4 层水洗厚度由 34.1% 增加到 82.1%，萨 II 1-3 层水洗厚度增加了 50.1%，表明聚合物驱有效地扩大了注水波及体积^[4]。

通过不断改进现场聚合物配注工艺技术，在先导性试验取得良好效果的基础上，1991 年大庆油田开始聚合物驱工业化试验，在北一区断西葡 I 1-4 层，试验区面积 3.13km²，地质储量 632 × 10⁴t，注采井数 61 口。试验区综合含水由 90.7% 降低到 73.9%，日产原油由 651t 上升到 1357t，试验区聚合物驱比水驱提高采收率 13.62%，每吨聚合物增加原油 130t^[5]。伴随着聚合物产品性能的提高，现场注入工艺技术的进步，大庆油田聚合物驱工业化试验取得良好提高采收率效果。

大庆油田于 1996 年开始进行聚合物驱工业化推广应用试验，截至 2010 年 12 月，大庆油田聚合物驱工业化区块 54 个，动用地质储量 7.56 × 10⁸t。其中 3 个典型区块的聚合物现

场试验参数和提高采收率结果列于表 2 中。表中数据可见，聚合物驱比水驱注入压力增加，吸水剖面得到调整，提高了波及效率，聚合物驱平均提高采收率比水驱增加 13%。大庆油田 6 个工业化区块中心井含水变化曲线见图 1。6 个区块中心井含水随着注入量的变化规律基本相同，主要有含水下降阶段、低含水稳定期和含水回升阶段组成，其中北二西和北一断东中心井含水下降幅度最大，最低含水达到 70%。

表 2 大庆油田 3 个典型区块的聚合物现场试验参数和试验结果

区块	井距 (m)	注入强度 (m ³ / (d·m))	聚合物浓度 (mg/L)	聚合物分子质量 (1×10 ⁴)	注入压力 (MPa)			提高采收率 (%)
					水驱	聚合物驱	压力差 Δ <i>p</i>	
大庆北一区	250	15.6	832	1200	5.5	11.3	5.8	12.5
大庆喇嘛甸	212	11.5	1002	1700	5.2	12.9	7.7	12.8
大庆杏五区	200	11.2	1207	1200	6.5	11.1	4.6	13.6
平均	220		1013		5.7	11.8	6.0	13.0

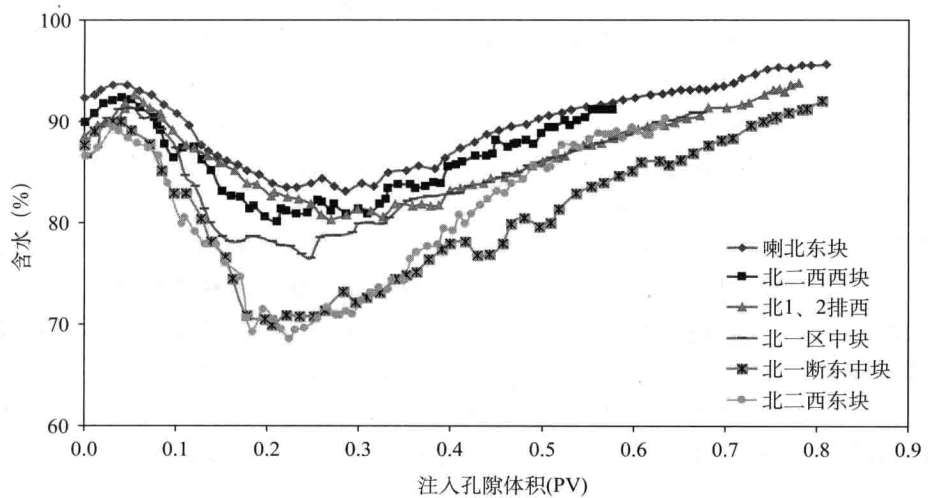


图 1 6 个聚合物驱工业化区块中心井含水变化曲线

大庆油田聚合物驱工业化应用规模及增油效果统计见表 3。聚合物驱累计原油产量达到 1.08×10⁸t，平均每吨聚合物采油量 118t，经济效益显著。目前，聚合物驱技术已经在辽河油田、新疆油田、大港油田等推广应用。聚合物应用的油藏类型由中高渗透率砂岩油藏向中低渗透率砂岩油藏、砾岩油藏、复杂断块油藏等推广应用 [6]。

表 3 聚合物驱工业化应用规模及增油效果

序号	参数	数据
1	区块数量	54
2	动用储量	7.56×10 ⁸ t
3	井数	12426

续表

序号	参数	数据
4	聚合物用量	$91 \times 10^4 \text{t}$
5	原油产量	$1.08 \times 10^8 \text{t}$
6	增油量	$66.78 \times 10^6 \text{t}$
7	每吨聚合物采油量	118t

聚合物驱技术在工业推广应用不断得到完善, 目前为止已经集成出十大配套技术成果, 涉及油藏工程、采油工程、地面工程和现场动态监测等多个方面。

(1) 聚合物筛选评价技术。

制定了驱油用聚合物产品质量检测评价标准^[7], 按照标准制定的评价方法和 11 项检测指标评价聚合物性能, 根据油藏条件选择适宜的聚合物产品, 严格控制进入现场的聚合物产品质量。

(2) 方案设计与数值模拟技术。

每一项聚合物驱试验和应用都要通过地质分析、油藏描述、层系组合、井网井距优化和注入参数优化的方案设计。研制出 POLYGEL 聚合物驱数值模拟软件平台, 可以进行方案优化和提高采收率效果模拟。

(3) 低剪切完井技术。

通过射孔弹和射孔参数优化改进了完井工艺, 降低了聚合物溶液流经炮眼的剪切降解。

(4) 高效配注设备与工艺。

针对新型超高相对分子质量聚合物母液浓度不稳定、误差较大、熟化时间较长等一系列问题, 成功地研制出具有旋流脱气等功能的分散装置、双螺带螺杆搅拌器和滤芯再生式母液过滤器, 形成了一套适合超高相对分子质量聚合物产品的配注工艺技术。使聚合物溶解熟化时间缩短, 溶液配制精度提高, 配注站的建设投资降低了 25% 以上, 运行费用减少了 10% 以上。针对偏心配水器对聚合物溶液剪切降解率高的问题, 开发了同心分注工艺技术, 通过环形降压槽同心配注器控制注入压力来降低聚合物的剪切降解, 使聚合物溶液的最大黏损率小于 5%^[8]。

(5) 分层注入技术。

当层间渗透率级差较大时, 采用聚合物驱分层注入技术可以较好地解决层间矛盾, 提高较差层段的注入强度, 从而改善聚合物驱整体技术经济效益。在层间渗透率级差为 2.5 以上时, 分层注入聚合物采收率比笼统注入提高采收率 2% 以上。结合理论与实践, 确定了聚合物驱分注原则为^[9]: 一是主要油层段间的渗透率级差不小于 2; 二是低渗透油层段的厚度占总厚度的 30% 以上; 三是隔层厚度不小于 1m 且分布较稳定; 四是在聚合物用量 200mg/L · PV 前适时分注。

(6) 聚合物驱前调剖技术。

在工业化聚合物驱推广应用过程中, 注聚区块的部分注入井存在特高渗透层段, 导致注聚压力低、生产井见聚合物早、采聚浓度上升快等问题^[10]。为了解决这些问题, 达到进一步改善聚合物驱开发效果和提高聚合物利用率的目的, 开展聚合物驱前置调剖技术研究和试验, 形成较为完善的聚合物驱调剖、防窜技术^[11], 发展并应用多种类型的调剖剂, 如

高黏弹凝胶、交联聚合物弱凝胶、体膨颗粒调剖剂等。建立调剖剂的评价方法,确定不同类型调剖剂的应用条件、注入时机和注入量等参数。采用前置调剖措施,防止驱替液发生窜流,增加油层动用程度,改善了聚合物驱扩大波及体积的作用。

(7) 采出系统防偏磨举升工艺技术。

通过黏弹性流体在油管和抽油杆环空中的流动试验研究,得出不同浓度黏弹性流体的法向力大小与流速及抽油杆偏心度的关系,确定了黏弹性流体流过井筒、泵阀及泵筒时流动阻力的变化规律,找出含聚抽油机井杆管偏磨的主要原因是黏弹性流体法向力的偏磨机理。在此基础上研制抽油机井杆柱受力测试技术,采取低摩阻大流道泵、全井扶正、统一杆径、定期旋转抽油杆组成的防偏磨措施。推广应用 8341 口井,运转 1365 天后,偏磨比例下降幅度 78.4%^[12]。

(8) 采出液处理工艺技术。

研制出适合于含聚采出液处理的新型油水分离剂,提高油水分离处理效果。改进以沉降过滤为主体的采出水处理工艺流程,缩短油水分离时间,水质三项主要指标的达标率明显提高。

(9) 现场动态检测技术。

在注入剖面测试方面,研发示踪相关流量测井技术,完善并推广脉冲中子氧活化和电磁流量测井技术,满足笼统注入剖面测试的需要,在分层测试中也见到一定的效果。在采出剖面测试方面,研发电导式相关流量测井和井下流体取样技术,应用于现场取得了良好的应用效果。

(10) 效果预测与经济评价技术。

研制聚合物驱效果评价相关软件,通过数值模拟和现场跟踪分析预测聚合物驱效果,在聚合物驱过程中不同的阶段采取不同的优化调整措施,保证聚合物驱现场应用效果,通过技术经济评价来评估不同区块应用聚合物驱的效果,及时总结经验找出不足,不断优化投入产出合理参数,提高油田整体经济效益。

总体而言,聚合物驱技术在中国三次采油化学驱提高采收率技术中目前占主导地位,现场应用表明聚合物驱适合我国陆相沉积非均质油层的特点,聚合物驱不仅在大庆整装砂岩油藏获得成功应用,而且随着技术不断发展和完善,聚合物驱应用正在向复杂断块油藏和砾岩油藏、黏度相对较低的稠油油藏、甚至高温高盐油藏扩展。聚合物驱年采油量自 2002 年以来一直维持在 $1000 \times 10^4 \text{t}$ 以上,“十二五”期间大庆 $4000 \times 10^4 \text{t}$ 稳产中三次采油的量达到 $1250 \times 10^4 \text{t}$ 主要依靠聚合物驱获得。聚合物驱技术在中国石油稳定原油产量中起了重要的作用(图 2),中国是目前世界上聚合物驱应用规模最大、增产效果最好的国家。

随着聚合物驱向不同类型油藏的推广应用,聚合物驱技术发展面临的主要技术挑战有:耐温抗盐高效聚合物的研制,包括适合中低渗透率油藏的中低相对分子质量高效增黏聚合物产品,适合高温高盐油藏的耐温抗盐聚合物产品等;注入工艺和设备的不断完善,例如,针对部分新型聚合物产品难溶解的问题,需要改进完善配注工艺,提高适应性和效率,降低成本;现场跟踪调整优化技术,根据油水井动静态数据及测试资料,及时确定单井调整措施等。

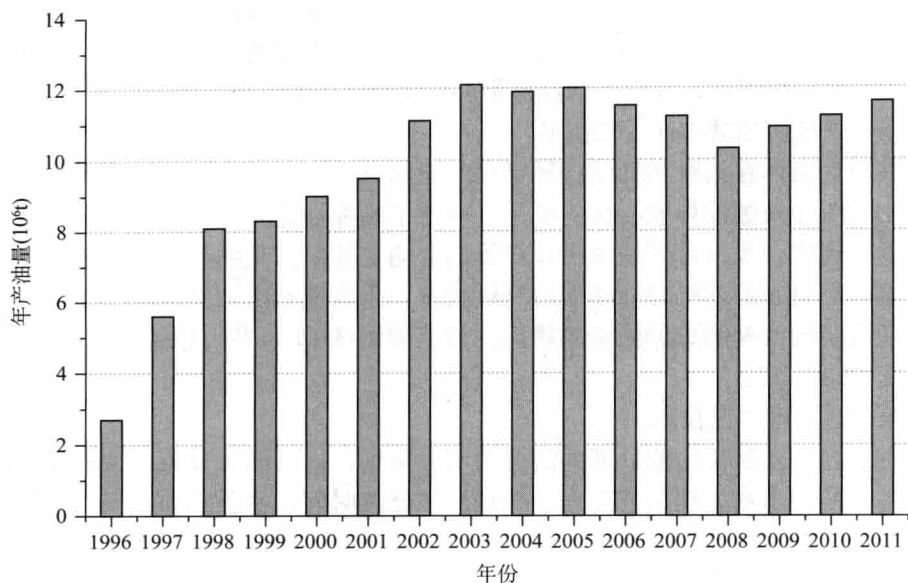


图2 中国石油聚合物驱年产量

2 化学复合驱技术发展历程和现状

2.1 化学复合驱技术发展历程

我国化学复合驱技术发展历程大致可以分为三个阶段。

第一阶段为 20 世纪 80 年代室内探索研究阶段。早期参考美国的研究动态，主要研究的体系是表面活性剂微乳液—聚合物驱，但由于形成微乳液体系需要的表面活性剂浓度很高，一般需要 3% ~ 10%（质量分数，下同）浓度，因成本高没有实施。然后转向研究碱—聚合物驱，主要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探索性研究。由于碱用量大对聚合物黏度影响较大，且降低油水界面张力性能十分有限，室内研究提高采收率幅度不高。之后转向碱—表面活性剂—聚合物驱三元体系，主要基于化学剂之间的协同作用，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（表面活性剂用量一般为 0.2% ~ 0.4%），同时依靠聚合物增加体系黏度，室内研究表明三元复合驱提高采收率幅度比其他化学驱效果好^[13]（表 4）。

表 4 几种化学驱提高原油采收率的潜力

提高原油采收率方法	增加采收率幅度 (%)
碱驱	2 ~ 5
聚合物驱	7 ~ 14
表面活性剂驱	5 ~ 11
碱—聚合物复合驱	9 ~ 16
碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱	15 ~ 27
泡沫复合驱	10 ~ 25

第二阶段为 20 世纪 90 年代，开展复合驱先导性试验阶段，也是复合驱技术发展最快的阶段。胜利油田于 1993 年在孤东油田进行了小井距三元复合驱探索性试验，在水驱产出程度 54% 条件下，实施三元复合驱提高采收率 13.4%，使总采收率达到 67.4%。大庆油田于 1994 年开始在中区西部、杏五区等试验区开展复合驱先导性试验，采用美国进口表面活性剂产品（OCT 公司 ORS-41，B100），先导性试验比水驱提高采收率 20% 以上^[14]。

第三阶段为 21 世纪，开展复合驱扩大试验和工业化试验阶段。基于先导性试验良好效果，通过研制国产高效表面活性剂，于 2001 年开始进行复合驱工业化试验。同时考虑改进现场配套工艺技术，包括三元配注工艺、防垢举升工艺和采出液处理工艺技术等。

2.2 化学复合驱类型及特点

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（图 3）。

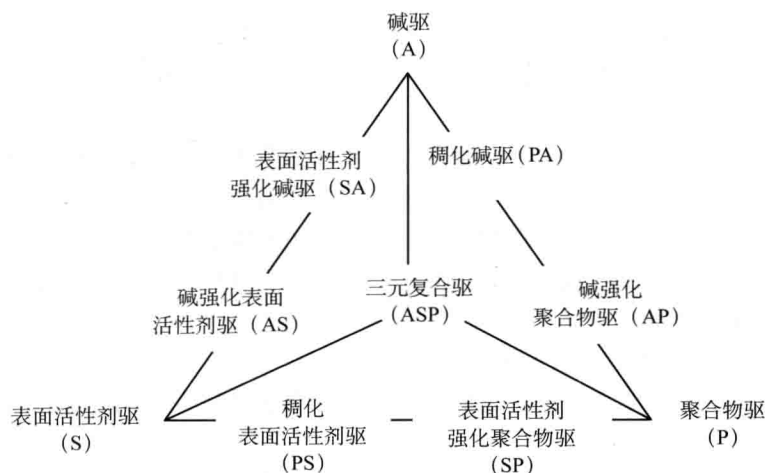


图 3 三种化学剂驱组合的复合驱种类

复合驱通常比单一组分化学驱的采收率更高。复合驱之所以有更好的驱油效果，主要由于其中的碱、表面活性剂和聚合物之间有协同效应。复合驱提高原油采收率最本质的作用是既具有降低油水界面张力提高驱油效率，又具有增加驱替液黏度扩大波及体积的双重作用。化学剂的不同组合有其不同的特点，可根据油藏的具体特点选择合适的复合驱驱油方法。

目前实际现场试验主要采用的化学复合驱主要有以下三种类型：碱—聚合物（AP）二元复合驱；碱—表面活性剂—聚合物（ASP）三元复合驱；表面活性剂—聚合物（SP）二元复合驱。其中以 ASP 三元复合驱试验项目最多。三种复合驱的作用机理和特点如下。

（1）碱—聚合物二元复合驱的作用特点。

碱—聚合物二元复合驱是在单一碱驱及聚合物驱基础上发展起来的，该复合驱的作用特点是：

① 碱能与原油中的有机酸或其他有机酸性组分反应就地生成少量具有表面活性的物质，使油水界面张力降低，提高驱油效率。

② 改变岩石表面电性，降低岩石对聚合物的吸附量。

③ 改变岩石表面的润湿性，使岩石由油润湿变为水润湿，有利于剩余油的启动、聚

并, 形成可连续流动的富油带而被采出。

④ 加入聚合物使水溶液黏度增加, 降低驱替液与油的流度比, 提高波及效率。

⑤ 碱一般采用强碱, 如 NaOH 等。

碱—聚合物二元复合驱存在的主要缺点是碱用量较大、且使用强碱对地层有一定伤害, 此外对于低酸值或酸性组分较少的原油适应性较差, 降低油水界面张力性能十分有限。另外碱用量大对聚合物体系黏度的影响较大, 因而近年来该复合体系的关注度下降。

(2) 碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱作用特点。

该复合驱是在二元复合驱的基础上发展起来的, 三元复合驱除了有上述二元复合驱的特点外, 还具有以下特点:

① 它能利用碱和表面活性剂的协同作用大幅度地降低油水界面张力, 同时具有乳化原油性能和改善岩石润湿性的功能, 可大幅度提高驱油效率。又能通过聚合物来增加驱替液的黏度, 改善油水流度比、提高波及效率, 因而它具有物理和化学有机结合的双重作用, 能大幅度提高原油采收率。

② ASP 体系使用的表面活性剂浓度低, 一般小于 0.4% (质量分数)。

③ ASP 体系使用的碱可以是强碱, 也可以用弱碱, 如: Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、 Na_2SiO_3 、 Na_3PO_4 等, 可减少碱对地层的伤害。

④ ASP 体系有机复合能拓宽低界面张力的活性区范围, 对油藏的适应性更广。

⑤ ASP 体系既适用于高酸值的原油, 也用于低酸值甚至是酸值接近零的原油。

ASP 三元复合驱目前多个现场试验证明提高采收率幅度大, 存在的主要问题是采用强碱体系造成结垢、乳化对采油举升和产出液处理不利, 同时驱油剂筛选时要考虑表面活性剂与聚合物的配伍性问题。

(3) 表面活性剂—聚合物二元复合驱特点。

① 依靠表面活性剂的作用降低油水界面张力提高驱油效率, 同时通过聚合物来增加驱替液的黏度, 提高波及效率。

② SP 体系使用的表面活性剂浓度低, 一般小于 0.4% (质量分数)。

③ 适用于高酸值的原油, 也用于低酸值甚至是酸值接近零的原油。

④ 不加碱可避免复合驱对地层的伤害, 防止结垢、乳化、腐蚀对采油举升工艺和产出液处理的影响, 无碱体系聚合物用量可以减少。

SP 二元复合驱避免加入碱的负作用, 在现场易于实施, 产出液后处理简化, 综合成本降低。存在的主要问题是表面活性剂的要求较高, 需要合成高界面活性的表面活性剂, 表面活性剂吸附损失相对三元驱会高, 对油藏的适应性相对三元驱较低。

总体而言, 化学复合驱体系种类多, 各自具有不同的特点, 可以根据不同油藏条件选择与之适应的驱油体系。目前, 化学复合驱总的发展趋势是: 复合体系由强碱三元复合驱向弱碱三元、无碱 SP 二元复合驱体系转变。

2.3 化学复合驱技术试验应用现状

大庆油田从 1994 年开始, 先后在不同地区开展了 5 个三元复合驱先导性矿场试验, 均取得了比水驱提高采收率 20% 左右的好效果^[15]。克拉玛依油田在二中区北部采用弱碱三元复合驱进行了砾岩油藏复合驱先导性矿场试验, 也取得提高采收率幅度 20% 以上的良好效果 (表 5)。

表 5 中国石油三元复合驱先导性矿场试验汇总表

区块	油藏类型	井网	注采井距 (m)	砂岩厚度 (m)	有效渗透率 (mD)	ASP 三元体系	采收率提高值 (%)
大庆中区西部三元复合驱矿场试验	砂岩	4 注 9 采 五点法	106	10.5	509	$\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{B}-100+\text{HPAM}$	21.4
大庆杏五区中部三元复合驱矿场试验	砂岩	1 注 4 采 五点法	141	8.4	589	$\text{NaOH}+\text{ORS41}+\text{HPAM}$	25.0
大庆小井距三元复合驱矿场试验	砂岩	3 注 4 采 五点法	75	13.1	567	$\text{NaOH}+\text{ORS41}+\text{HPAM}$	23.24
大庆杏二区西部三元复合驱矿场试验	砂岩	4 注 9 采 五点法	200	7.0	658	$\text{NaOH}+\text{ORS41}+\text{HPAM}$	19.40
大庆北一断西三元复合驱矿场试验	砂岩	6 注 12 采 五点法	250	12.9	512	$\text{NaOH}+\text{ORS41}+\text{HPAM}$	20.63
克拉玛依二中区北部三元先导性矿场试验	砾岩	4 注 9 采 五点法	50	19.5 ~ 24.0	157	$\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{KPS}+\text{HPAM}$	24.5

在三元复合驱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国产表面活性剂工业化产品开展了复合驱工业性矿场试验 (表 6)。从油藏类型而言, 由一类向二类油藏扩大应用。为了降低强碱的负面影响, 检验弱碱复合驱效果, 2005 年大庆油田利用自主研发的国产石油磺酸盐表面活性剂开展了弱碱三元复合驱扩大矿场试验。

表 6 三元复合驱工业化矿场试验汇总表

区块	井网	注采井距 (m)	砂岩厚度 (m)	有效渗透率 (mD)	ASP 三元体系	预测提高采收率 (%)
大庆杏二中一类强碱复合驱	17 注 27 采 五点法	250	10.6	850	$\text{NaOH}+\text{HABS}+\text{HPAM}$	18.6
大庆南五区一类强碱复合驱	29 注 39 采 五点法	175	13.3	867	$\text{NaOH}+\text{HABS}+\text{HPAM}$	20.5
大庆北一断东二类强碱复合驱	49 注 63 采 五点法	125	10.6	670	$\text{NaOH}+\text{HABS}+\text{HPAM}$	26.5
大庆北二西二类弱碱复合驱	35 注 44 采 五点法	125	8.1	533	$\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{DPS}+\text{HPAM}$	21.6

三元复合驱工业化试验也已经取得大幅度提高石油采收率的良好效果, 目前进入工业化试验推广应用阶段, 试验证明化学复合驱是继聚合物驱后我国水驱开发老油田大幅度提高原油采收率的有效技术之一, 大庆油田将化学复合驱作为“十二五”以后的主导推广技术, 作为稳定 $4000 \times 10^4 \text{t}$ 原油产量的重要保障措施之一。

化学复合驱技术在试验应用中不断得到完善, 目前已经初步形成系列技术体系, 涉及复合体系配方优化、油藏工程、采油工程、地面工程和现场动态监测等多个方面。

(1) 复合驱体系配方评价与优化。

制定了复合驱用表面活性剂产品质量检测评价标准^[16], 按照标准制定的评价方法和检测指标评价表面活性剂及复合体系性能, 根据油藏条件筛选适宜的表面活性剂、聚合物产