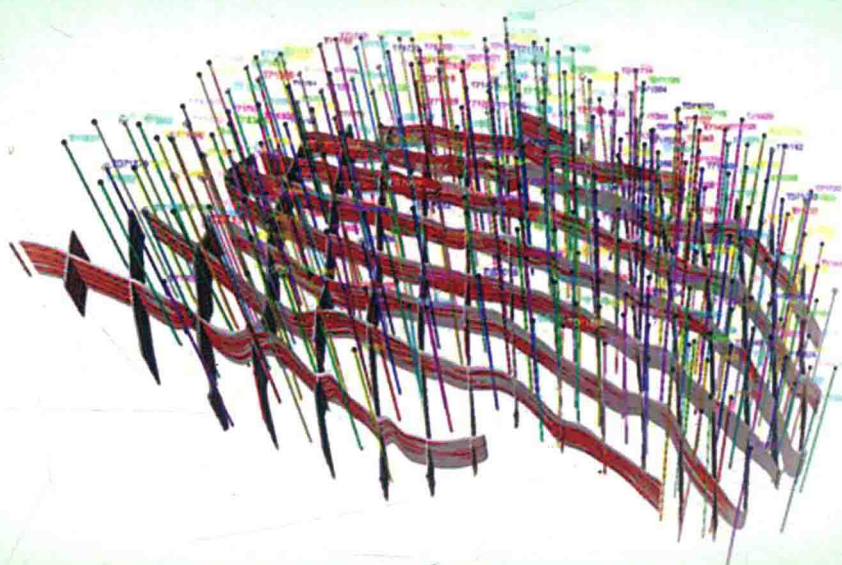


准噶尔盆地油气勘探开发系列丛书

新疆砾岩油藏 聚合物驱研究与应用

STUDY AND APPLICATION ON POLYMER FLOODING OF CONGLOMERATE RESERVOIR IN XINJIANG OILFIELD

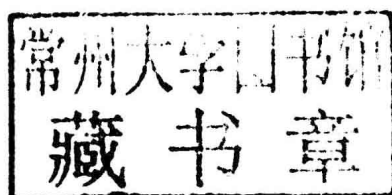
顾鸿君 钱根葆 刘顺生 等著



石油工业出版社

新疆砾岩油藏聚合物驱研究与应用

顾鸿君 钱根葆 刘顺生 等著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书是新疆砾岩油藏聚合物驱开发技术的系统总结,主要介绍新疆砾岩油藏聚合物驱工业化试验中形成的一系列配套技术,包括砾岩油藏精细油藏描述技术、聚合物驱油体系评价与优化技术、聚合物驱数值模拟技术、现场跟踪调整技术、监测与检测技术、注采工艺技术、聚合物驱效果评价技术等,总结了工业化试验的成功经验,可为今后同类试验的开展提供参考。

本书可供从事油气田开发工作的科研人员及高等院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

新疆砾岩油藏聚合物驱研究与应用/顾鸿君等著.

北京:石油工业出版社,2016.9

(准噶尔盆地油气勘探开发系列丛书)

ISBN 978-7-5183-1425-6

I. 新…

II. 顾…

III. 砾岩-岩性油气藏-油田开发-高聚物-化学驱油-研究-新疆

IV. TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 192773 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

编辑部:(010)64523543 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

2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.25

字数:262 千字

定价:80.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

《新疆砾岩油藏聚合物驱研究与应用》

编写人员

顾鸿君 钱根葆 刘顺生 王延杰

楼仁贵 赵美刚 徐崇军 聂小斌

石善志 王金泰

序

准噶尔盆地位于中国西部,行政区划属新疆维吾尔自治区。盆地西北为准噶尔界山,东北为阿尔泰山,南部为北天山,是一个略呈三角形的封闭式内陆盆地,东西长 700 千米,南北宽 370 千米,面积 13 万平方千米。盆地腹部为古尔班通古特沙漠,面积占盆地总面积的 36.9%。

1955 年 10 月 29 日,克拉玛依黑油山 1 号井喷出高产油气流,宣告了克拉玛依油田的诞生,从此揭开了新疆石油工业发展的序幕。1958 年 7 月 25 日,世界上唯一一座以石油命名的城市——克拉玛依市诞生。1960 年,克拉玛依油田原油产量达到 166 万吨,占当年全国原油产量的 40%,成为新中国成立后发现的第一个大油田。2002 年原油年产量突破 1000 万吨,成为中国西部第一个千万吨级大油田。

准噶尔盆地蕴藏着丰富的油气资源。油气总资源量 107 亿吨,是我国陆上油气资源当量超过 100 亿吨的四大含油气盆地之一。虽然经过半个多世纪的勘探开发,但截至 2012 年底石油探明程度仅为 26.26%,天然气探明程度仅为 8.51%,均处于含油气盆地油气勘探阶段的早中期,预示着巨大的油气资源和勘探开发潜力。

准噶尔盆地是一个具有复合叠加特征的大型含油气盆地。盆地自晚古生代至第四纪经历了海西、印支、燕山、喜马拉雅等构造运动。其中,晚海西期是盆地拗陷构造格局形成、演化的时期,印支—燕山运动进一步叠加和改造,喜马拉雅运动重点作用于盆地南缘。多旋回的构造发展在盆地中造成多期活动、类型多样的构造组合。

准噶尔盆地沉积总厚度可达 15000 米。石炭系—二叠系被认为是由海相到陆相的过渡地层,中、新生界则属于纯陆相沉积。盆地发育了石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系六套烃源岩,分布于盆地不同的凹陷,它们为准噶尔盆地奠定了丰富的油气源物质基础。

纵观准噶尔盆地整个勘探历程,储量增长的高峰大致可分为西北缘深化勘探阶段(20 世纪 70—80 年代)、准东快速发现阶段(20 世纪 80—90 年代)、腹部高效勘探阶段(20 世纪 90 年代—21 世纪初期)、西北缘滚动勘探阶段(21 世纪初期至今)。不难看出,勘探方向和目标的转移反映了地质认识的不断深化和勘探技术的日臻成熟。

正是由于几代石油地质工作者的不懈努力和执著追求,使准噶尔盆地在经历了半个多世纪的勘探开发后,仍显示出勃勃生机,油气储量和产量连续 29 年稳中有升,为我国石油工业发展做出了积极贡献。

在充分肯定和乐观评价准噶尔盆地油气资源和勘探开发前景的同时,必须清醒地看到,由

于准噶尔盆地石油地质条件的复杂性和特殊性,随着勘探程度的不断提高,勘探目标多呈“低、深、隐、难”的特点,勘探难度不断加大,勘探效益逐年下降。巨大的剩余油气资源分布和赋存于何处,是目前盆地油气勘探研究的热点和焦点。

由新疆油田公司组织编写的《准噶尔盆地油气勘探开发系列丛书》历经近两年时间的努力,今天终于面世了。这是第一部由油田自己的科技人员编写出版的专著丛书,这充分表明我们不仅在半个多世纪的勘探开发实践中取得了一系列重大的成果、积累了丰富的经验,而且在准噶尔盆地油气勘探开发理论和技术总结方面有了长足的进步,理论和实践的结合必将更好地推动准噶尔盆地勘探开发事业的进步。

系列专著的出版汇集了几代石油勘探开发科技工作者的成果和智慧,也彰显了当代年轻地质工作者的厚积薄发和聪明才智。希望今后能有更多高水平的、反映准噶尔盆地特色地质理论的专著出版。

“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索”。希望从事准噶尔盆地油气勘探开发的科技工作者勤于耕耘,勇于创新,精于钻研,甘于奉献,为“十二五”新疆油田的加快发展和“新疆大庆”的战略实施做出新的更大的贡献。

新疆油田公司总经理

2012.11.8

陈洪发

前言

新疆油田砾岩油藏大多已进入高含水开发阶段,由于砾岩油藏的储层非均质性强和速敏性,油藏中仍残留大量的剩余油,水驱采收率较低。为了进一步提高砾岩油藏的采收率,新疆油田开展了七东1区克下组砾岩油藏聚合物驱配套技术研究,实施了聚合物驱工业化现场试验,取得了显著的增油效果,中心井区提高采收率达12.1%,为砾岩油藏的开发接替提供了技术支持。本书系统总结了新疆油田砾岩油藏聚合物驱技术应用的成功经验。全书共分七章,包括绪论、新疆砾岩油藏地质特征、新疆砾岩油藏聚合物驱适应性分析、聚合物驱油体系优化、砾岩油藏聚合物驱数值模拟、砾岩油藏聚合物矿场注入与调控、砾岩油藏聚合物驱配套技术。

本书详细介绍了新疆砾岩油藏聚合物驱技术,对提高砾岩油藏采收率具有很高的参考价值,也可供从事三次采油及其他相关专业技术人员,以及高等石油院校师生参考使用。

本书由顾鸿君、钱根葆、刘顺生、王延杰、楼仁贵、赵美刚、徐崇军、聂小斌、石善志、王金泰编写。全书由顾鸿君、楼仁贵统稿,王延杰主审。在编写过程中,西南石油大学提供了技术支持。在此向参与编写的所有人员和为此书提供资料的科研工作者致以衷心的感谢!此外,书中还引用了相关人员的文献以及某些科研成果,在此一并表示感谢!

限于笔者水平,书中难免存在不足甚至错误之处,敬请读者批评指正。

CONTENTS 目录

第一章 绪论	(1)
第一节 聚合物驱国内外研究现状	(1)
第二节 新疆砾岩油藏聚合物驱发展历程	(3)
第二章 新疆砾岩油藏地质特征	(7)
第一节 储层特征	(7)
第二节 构造特征	(27)
第三节 沉积特征	(29)
第四节 岩矿特征	(32)
第四节 注采连通情况	(34)
第三章 新疆砾岩油藏聚合物驱适应性分析	(37)
第一节 适合聚合物驱的油藏特征概述	(37)
第二节 聚合物与砾岩油藏的配伍性分析	(39)
第三节 分区聚合物驱控制程度分析	(41)
第四章 聚合物驱油体系优化	(43)
第一节 聚合物驱油体系室内研究	(43)
第二节 聚合物驱物理模拟实验研究	(49)
第五章 砾岩油藏聚合物驱数值模拟	(64)
第一节 模拟模型的建立	(64)
第二节 历史拟合	(67)
第三节 方案优化	(76)
第四节 指标预测	(83)
第六章 砾岩油藏聚合物驱矿场注入与调控	(85)
第一节 聚合物驱现场实施效果分析	(85)
第二节 注入及产出液监测	(99)
第七章 砾岩油藏聚合物驱配套技术	(115)
第一节 砾岩油藏水流优势通道识别与封堵	(115)
第二节 聚合物驱注采工艺技术	(128)
第三节 聚合物驱地面工程	(133)
参考文献	(153)

第一章 绪 论

聚合物驱油技术是一种日趋成熟的提高注水开发油田采收率的有效方法,其在油田开发中的作用越来越受到重视,正由矿场试验逐步走向工业化矿场应用。大庆油田聚合物驱提高采收率技术已经形成了较为完善的油藏、工程、工艺系列配套技术,实现了从室内研究到先导性矿场试验、工业性矿场试验、大规模工业化推广的三个飞跃,为聚合物驱大规模应用奠定了坚实的基础。聚合物驱油技术之所以能够大幅度提高注水开发油田原油采收率,一方面是由于聚合物溶液黏度较高,能够有效改善水油流度比,缓解层间矛盾,改善吸液剖面,扩大驱替液体波及体积,从而提高宏观波及效率;另一方面,利用聚合物溶液的黏弹效应,可以驱替水驱残余油,从而提高微观驱油效率。

新疆油田砾岩油藏大多已进入高含水开发阶段,由于砾岩油藏的储层非均质性强和速敏性,油藏中仍残留大量的剩余油,水驱采收率较低。为了进一步提高砾岩油藏的采收率,近年来,新疆油田组织大量的研究力量,开展了砾岩油藏聚合物驱配套技术研究,实施了聚合物驱工业化现场试验,取得了显著的增油效果,为加快技术创新并形成砾岩油藏配套的战略性的开发接替技术奠定了基础。

第一节 聚合物驱国内外研究现状

一、国外聚合物驱进展

美国于 20 世纪 50 年代末开始聚合物驱的室内研究,并于 1964 年开始了矿场试验。1970—1985 年,美国共开展 183 次聚合物驱矿场试验。原苏联的奥尔良油田和阿尔兰油田、加拿大的 Horsefly Lake 油田、法国的 Chatearenard 油田及罗马尼亚油田都进行了聚合物驱工业性试验,聚合物驱的研究与应用达到一个高潮期。1986 年后,由于原油价格下跌,西方主要的大石油公司取消了在聚合物驱方面的尝试,但室内研究一直没有停止。截至 2000 年,全球共有 20 多个油田或区块进行了聚合物驱矿场试验。

近年来,美国在胶态分散凝胶技术(CDG)方面有较大发展,矿场试验已取得良好的效果。胶态分散凝胶技术在一定条件下可以单独使用或与其他聚合物驱油剂结合使用,采收率更高。胶态分散凝胶技术结合了常规聚合物驱油和调剖堵水的特点,而且进行的多数矿场试验均获得了成功,因此受到普遍关注。美国能源部对提高原油采收率(EOR)的基础研究十分重视,以流体深部转向技术为工作重点,在表面活性剂—聚合物的相互作用、吸附损失等界面化学问题的理论研究基础上加强了在分子物理、分子化学、流变学等学科上的研究,在化学剂合成领域开发了多种耐温、抗盐聚合物。

二、国内聚合物驱进展

中国的油田大多数属于陆相沉积地层,油层非均质性比较严重,渗透率变异系数大多在

0.65 以上,而且原油黏度较高,90% 以上的地质储量的原油黏度大于 $5\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。因此聚合物驱是国内近年来提高采收率研究的主攻方向。中国自 20 世纪 70 年代开始,大庆、胜利、新疆等油田都先后开展了规模不等的聚合物驱室内研究、矿场试验、扩大工业试验及工业化应用。80 年代以后,我国聚合物驱油技术开始快速发展,在“七五”、“八五”和“九五”期间内,该项技术连续被列入国家重点科研攻关项目,并且在聚合物驱油机理上有了新的认识,认为聚合物驱不仅能够降低水油流度比、扩大波及体积,还能提高微观驱油效率。经过 30 多年的发展,国内聚合物驱油技术取得了较大进展,已经可以比较准确地用数值模拟技术对驱替动态和驱油效果进行预测,矿场试验取得明显效果,并形成了配套的驱油技术。主要包括:评价聚合物驱油藏工程的方法和聚合物驱矿场应用技术、矿场聚合物驱油配套技术系列,注水后期油藏精细描述研究,聚合物的筛选与评价,聚合物驱油数值模拟,聚合物驱油经济评价等。

目前,中国已成为世界上使用聚合物驱油技术规模最大、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,其中,大庆油田砂岩油藏聚合物驱已达到国内规模最大,年产已达 $1000\times 10^4\text{t}$ 以上,超过大庆油田总产量的三分之一。

大庆油田聚合物驱油技术的发展可以划分为 4 个阶段:室内研究实验、先导性矿场试验、工业性矿场试验、工业化大规模推广应用。大庆油田聚合物驱的成果应用不仅取得了大量的研究成果和实践经验,在对聚合物驱油技术的理论认识上也取得了重大突破。大庆油田的聚合物驱油技术以其规模大、技术含量高、经济效益好,创造了世界油田开发史上的奇迹,多项技术已处于世界领先水平。

1964—1972 年,聚合物驱油技术处在室内研究实验阶段,该阶段主要对聚合物驱油的机理及油层适应性开展探索性研究,通过研究,得出了大庆油田地质条件和油层流体性质适合聚合物驱油技术开发应用的结论。

1972 年 9 月,在萨北 501 井组开展了注入聚合物提高采收率先导性矿场试验研究,大庆油田聚合物驱油现场试验研究的序幕从此拉开。在此后的 20 年,先后开展了萨北地区厚油层,萨中地区西部单、双层的先导性矿场试验研究工作,矿场试验从单一井组扩大至四个井组。随着矿场试验研究的逐渐深入,聚合物驱油技术的机理和提高采收率效果得到了更清晰的认识,在萨中地区西部开展的两个先导性矿场试验中,中心井原油采收率提高了 11%~14%,获得了吨聚增油量 150~177t 的好效果。该阶段是理论和实践相结合,同时通过实践进行再认识的过程。

1993 年以后,在先导性矿场试验取得良好效果的基础上,又分别在喇嘛甸油田南部和萨中北一区断西开展了三个不同井网井距的工业性矿场试验,试验总井数分别为 35 口、42 口和 62 口,试验面积分别为 1.45km^2 、 2.09km^2 和 3.13km^2 。试验结果表明:聚合物驱油技术不但能够改善原水驱动用状况较差油层的吸水状况、扩大油层的波及体积,而且可以提高驱油效率。其中两项矿场试验采收率都提高 12% 以上,取得了吨聚增油量 120t 以上的好效果,试验的成功为聚合物驱油技术工业化推广奠定了坚实的基础。该阶段是发展和完善聚合物驱及相关配套技术的过程,使聚合物驱油技术更加成熟。

1996 年开始,进入了聚合物驱油工业化推广阶段。随着聚合物注入区块的逐年增加,原油年产量也逐渐上升,从 1996 年的 $215\times 10^4\text{t}$ 增加到 2005 年的 $1033.5\times 10^4\text{t}$,并且连续四年保持在 $1000\times 10^4\text{t}$ 以上。聚合物驱原油年产量占油田总产量的比例也从 1996 年的 5.26% 增

加到 2005 年的 27%。截至 2005 年底,投产了 34 个工业化区块,动用面积达 314.8km^2 ,动用石油地质储量为 $5.19 \times 10^8\text{t}$ (其中动用 II 类油层的石油地质储量为 $1874.6 \times 10^4\text{t}$),聚合物驱总井数共计 5742 口,聚合物干粉累计注入量为 $58.37 \times 10^4\text{t}$,聚合物驱累计生产原油量为 $9124 \times 10^4\text{t}$,累计增油量达 $5050.9 \times 10^4\text{t}$ 。随着聚合物驱油技术的日趋成熟,各项配套技术措施的日益完善及聚合物驱规模的逐年加大,聚合物驱油技术已成为减缓油田产量递减及高含水后期提高油田开发水平的重要技术手段。目前,大庆油田已经成为中国乃至世界上最大的聚合物驱开采基地。

1990 年,郭尚平、黄延章等利用微观渗流模型进行了聚合物溶液驱油的微观机理研究,认为聚合物溶液驱提高驱油效率的机理是由于聚合物溶液与油的剪切应力大于水与油的剪切应力。近几年来,王德民等初步探索聚合物溶液的黏弹性对微观驱油效率影响:从一些微观驱油实验中发现,黏弹性流体和黏性流体在同样条件下驱替水驱后残余油,前者的驱油量大大超过了后者的驱油量。中国油田化学界从事疏水缔合聚合物的研究始于 1995 年,西南石油学院罗平亚教授所领导的研发小组、石油勘探开发研究院油化所、四川大学的黄荣华教授所领导的研发小组等多个课题小组对此进行了持续而深入的研究。2002 年,大庆石油学院的宋考平教授又从分子动力学的角度解释了聚合物驱提高驱油效率的机理。周晖、黄荣华采用自由基胶束共聚法制备了水溶性的丙烯酰胺、丙烯酸正辛酯疏水缔合共聚物。研究了共聚物水溶液的性能及其影响因素。随疏水基团含量的增加,共聚物在水中的特性黏数 η 减少,代表分子线团间流体力学相互作用的 Huggins 常数 K_H 增大。随共聚物浓度增加,在临界缔合浓度 C^* 以上,分子间缔合大量形成,水溶液表观黏度急剧增加。2012 年,曹瑞波、王晓玲等针对低渗透层动用程度低、部分聚合物驱块注入困难、聚合物用量过大等实际问题,提出多段塞交替注入方式,并将该注入方式应用于大庆油区 4 个试验区,该技术取得了成功应用,有效控制了含水率上升,增加产油量 $1.4 \times 10^4\text{t}$ 以上,并节省聚合物用量 18.6%。所有这些研究成果,对聚合物驱油技术的研究有了新的认识,产生了质的飞跃。

第二节 新疆砾岩油藏聚合物驱发展历程

为了寻找提高砾岩油藏开发效果的新途径,1970 年在克拉玛依油田三 3 区克下组,应用部分水解聚丙烯酰胺作为稠化剂进行了驱油试验。在现场试验之前,室内进行了聚合物特性研究、配方筛选及模拟实验,为现场试验做了充分的技术准备。

一、聚合物驱油室内实验

1. 配方筛选

1960 年年末,新疆油田开展了聚合物配方筛选,筛选出的聚合物溶液配方是:分子量为 300 万且含量为 8% 的聚丙烯酰胺、六偏磷酸钠、氢氧化钠,在聚合物水溶液中的质量百分数分别为 0.75%、0.05% 和 0.1%。其配方的优点是:六偏磷酸钠能络合地层水中的钙离子、镁离子,防止部分聚丙烯酰胺分子与钙离子、镁离子反应产生沉淀;氢氧化钠能提高水解度,增加驱替剂的黏度,使黏度由之前的 $1.98\text{mPa} \cdot \text{s}$ 升至 $4.69\text{mPa} \cdot \text{s}$;岩心吸附能力小,在弱亲水砂粒上的动吸附量为 0.114mg/g (砂),在弱亲油砂粒上的动吸附量为 0.069mg/g (砂);对钢材的腐

蚀率小,仅为 $0.012\text{mg}/\text{cm}^3 \cdot \text{d}$;对油层泥质胶结物无影响。

2. 室内模拟实验

应用室内管状和平面模型,对聚合物溶液的配制方法和注入工艺进行了大量的实验研究。注清水和注聚合物平行驱油实验发现,用聚合物驱油达到与清水驱油相同的采收率值时,前者比后者少注 $0.4 \sim 1.0$ 倍孔隙体积(PV)。用黏度为 $5\text{mPa} \cdot \text{s}$ 单位的聚合物驱油时,提高无水采收率 7.6% ,当含水率达 90% 时,采收率比注清水提高 20% 左右。

用不同黏度聚合物驱油实验表明,随着聚合物黏度的增大,采收率提高,含水率降低。当聚合物黏度达 $5\text{mPa} \cdot \text{s}$ 时(原油黏度 $35\text{mPa} \cdot \text{s}$),再增加聚合物黏度,含水率下降幅度较大,而采收率增加幅度很小,故合理的油水黏度比宜控制在 7 左右。

交替注清水和聚合物驱油,选用了不同黏度聚合物和不同注入量的三组方案进行实验,第一组先注清水 0.18PV ,再注黏度分别为 $2.48\text{mPa} \cdot \text{s}$ 和 $5.5\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的聚合物各 0.16PV ,最后注清水结束,与水驱油相比,提高采收率 20% 左右;第二组先注清水 0.17PV ,再注黏度为 $2.2\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的聚合物结束,提高采收率 10% ;第三组也是先注清水 0.18PV ,再注黏度为 $10.9\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的聚合物 0.18PV ,然后注清水至结束,提高采收率 9% 左右。三组实验表明,聚合物黏度为 $5\text{mPa} \cdot \text{s}$ 左右、注入段塞约 0.3PV 时,效果最好。

二、井组聚合物驱油先导试验

1970年,选择克拉玛依油田三3区3013井组开展小井距聚合物驱油先导试验。该井组注采井距为 75m ,3口注入井,4口采油井,3013井为中心评价井,试验面积 41574m^2 ,地质储量 33229t 。试验目的层为 S_7^3 ,岩性以不等粒砾岩为主,粒径 $10 \sim 30\text{mm}$,砾岩以变质岩块为主,胶结疏松。有效厚度 $4.5 \sim 10\text{m}$,平均 7.6m ,孔隙度 19.8% ,含油饱和度 65% ,地层原油黏度 $21.6\text{mPa} \cdot \text{s}$,地层温度 20°C ,原油密度 $0.8755\text{g}/\text{cm}^3$,有效渗透率 $78 \sim 660\text{mD}$,级差 8 倍,原油凝固点为 -63°C ,孔隙体积 39700m^3 。中心井控制面积 7300m^2 ,地质储量 6825t ,有效厚度 8.89m ,有效渗透率 330mD ,孔隙体积 10600m^3 。3口注入井于1970年5月22日投注清水,两个月后,4口采油井先后见水,无水采油期 $79 \sim 178\text{d}$,水推速度 $0.94 \sim 0.42\text{m}/\text{d}$;截至1970年12月底,3013井含水率达 12.3% ,平均月含水率上升速度 3% ,产量由见水前的 $6\text{t}/\text{d}$ 降至 $1.4\text{t}/\text{d}$,流压由 4.4MPa 降为 3.7MPa ,其他3口采油井也有类似的变化。

1970年12月26日开始注聚合物,前三个月注黏度为 $1.5\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的聚合物 1843m^3 ,占孔隙体积的 4.6% 。1971年4月1日至12月底,注黏度为 $2\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的聚合物 4379m^3 ,占孔隙体积的 11.2% ,1972年1月,聚合物黏度提高到 $5\text{mPa} \cdot \text{s}$,至1973年2月结束试验,转为注清水。经过两年两个月试验,共注聚合物 12145m^3 ,注入孔隙体积 30% ,基本完成了注聚合物段塞设计要求。

3013中心评价井注聚合物49天后开始见效,产量由 $1.4\text{t}/\text{d}$ 回升到 $1.7\text{t}/\text{d}$ 左右,稳产10个月,含水率由 12.3% 降至 8% 左右。1971年10月进行压裂,产油 $2 \sim 3.84\text{t}/\text{d}$,保持了8个月,截至1973年4月,产量降至 $0.69\text{t}/\text{d}$,含水率为 46.8% ,累计产油量为 2159.2t ,采出程度 31.6% 。井组其他3口井,注聚合物3个月后又先后见效,全井组累计产油量为 12148.7t ,采出程度 36.56% ,与注清水相比,提高采收率 11% 。井组周围的采油井见到聚合物效果后,产量都有不同程度的提高,由此可见,注聚合物的效果是明显的。

试验表明,由于地层的吸附作用,采出液中聚合物浓度为 0.2% 左右,与注入液中聚合物浓度相比,0.3% ~0.5% 被油层吸附。当注入聚合物黏度提高到 5mPa·s 以后,注水井压力很快由 6.4MPa 升至 9.5MPa,采油井流压由 6.1MPa 降至 5MPa。由此可见,聚合物进入大孔隙喉道降低了油层渗透率,迫使水向小的孔隙喉道中扩散,提高了波及系数,增加了原油产量,提高了采收率。按成本计算,每吨聚合物可换取 38t 原油,即注聚合物所需费用只占增产原油销售价的 10%,经济效益明显。

三、聚合物驱油扩大试验

聚合物驱油扩大试验,是在先导试验成功的基础上,选择 3013 井组以东相邻的 4 个井组进行的。该井区 1965 年 8 月投入开发,为九点面积注水井网,井距 250m,4 口注入井,21 口采油井,为正常生产井网(见图 1-1)。目的层为克下组 S_7^2 、 S_7^3 两个砂层,4 个单层,岩性以山麓洪积相砾岩为主,夹有不稳定的砂泥岩透镜体,地质储量 204.81×10^4 t,面积 1.5km^2 ,有效厚度 11.45m,地层原油黏度 21.6mPa·s,原油密度 0.8765g/cm^3 ,油层温度 20°C ,分析渗透率 564mD,有效渗透率 101mD,原始地层压力和饱和压力均为 6.5MPa。

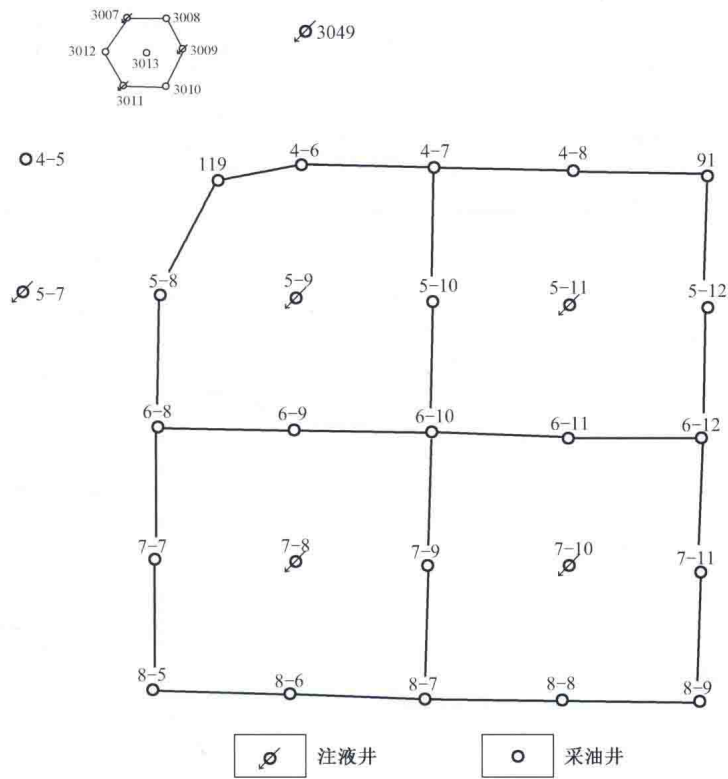


图 1-1 3013 井组及试验区示意图

1973 年 5 月开始试验。试验前 4 口注入井已注清水 $21.5 \times 10^4\text{m}^3$,占孔隙体积的 9.35%,累计产油量为 $26.03 \times 10^4\text{t}$,采出程度为 12.63%,综合含水率为 8%,21 口采油井已有 10 口含水,单井含水率最高达 50%。试验中按 3013 井组的配方,将注入剂加入罐内,搅拌均匀,放置三天使其水解,然后注入油层。试验持续了 9 年,于 1982 年 5 月底结束,转为注清水,至此,共

注入黏度为 $4.3\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的聚合物 334743m^3 , 占孔隙体积的 15%。累计采油量为 $50.48 \times 10^4\text{t}$, 采出程度为 26.6%, 累计注水量为 $71.76 \times 10^4\text{m}^3$, 21 口井全部含水, 综合含水率为 74.24%。

通过试验取得如下成果:

(1) 调整了吸水剖面。大量的吸水剖面资料显示, 4 口注入井的吸水状况均得到不同程度的改善, 如 7-10 井注聚合物前 S_7^{3-3} 小层、 S_7^{3-1} 小层吸水很弱, 两年后吸水状况有所好转, 9 年后成了吸水强度最大的层。

(2) 油井含水率下降, 产量稳定或上升。18 口采油井见到聚合物驱油效果, 占 21 口井的 86%, 见效后产量稳定或略有上升, 含水率下降, 如 7-10 和 5-9 两个井组, 12 口油井见效, 日产油水平比注清水增加近一倍, 见效时间 5~8 个月, 综合含水率由 23.3% 下降到 15.9%。

(3) 提高了注入水波及系数。试验区综合含水率为 70% 时, 测算波及系数为 66%, 而相同条件下, 只注清水的井区(三 3 区)波及系数为 50%, 二者相比提高 16%。

(4) 提高了采收率。由动态资料统计分析和一维二相概算拟合, 当综合含水率为 70% 时, 与注清水相比, 提高阶段采收率 2.7%, 增产原油 $5.3 \times 10^4\text{t}$, 即吨聚增油量为 20.5t。经驱替特征曲线预测, 最终采收率可达 33%, 与注清水相比, 提高采收率 7.3%。

该试验因聚合物性能不稳定与供货不及时, 影响了试验效果。

第二章 新疆砾岩油藏地质特征

克拉玛依油田七东1区克下组油藏聚合物驱工业化试验区位于克拉玛依市东南约30km,地面海拔260~275m。该试验区属I类砾岩油藏,其构造为一东南倾向的单斜,内部不存在断裂,落差梯度1.5m/10m,地层倾角9°左右,自西北向东南高度落差180m。试验区实施井位图如图2-1所示。

七东1区克下组试验区面积1.253km²,原始地质储量 193.9×10^4 t,油藏温度34.3℃,原始地层压力为16.8MPa,饱和压力为14.8MPa,压力系数1.44,原始气油比86m³/t,体积系数1.175。地层原油密度0.857g/cm³,地层原油黏度5.13mPa·s,地层水为NaHCO₃型,地层水总矿化度28868mg/L。

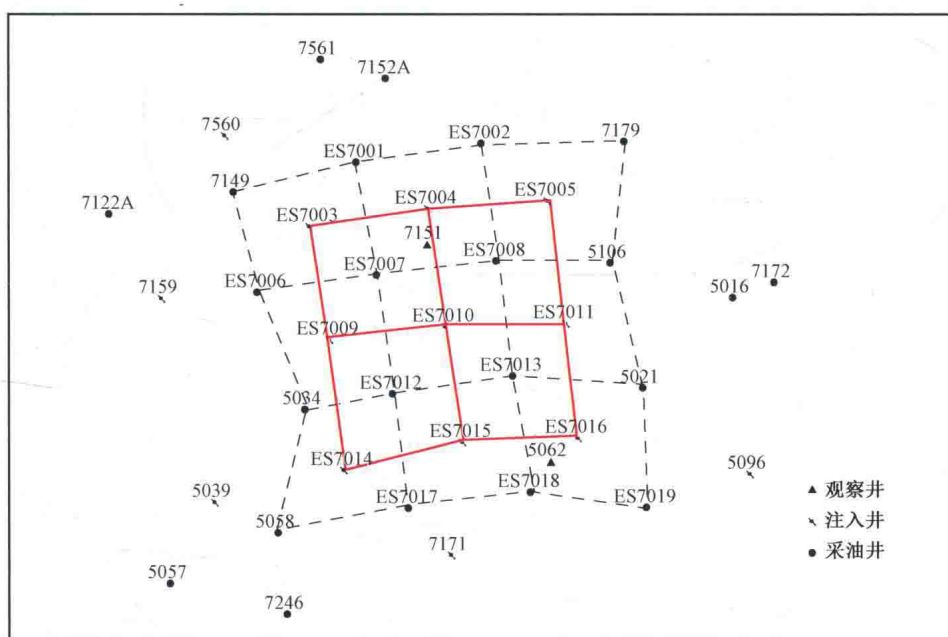


图2-1 七东1区克下组油藏聚合物驱试验区实施井位图

第一节 储层特征

一、孔隙结构特征

七东1区砾岩油藏的储层孔隙结构具有复模态的特征,以砾石为骨架的孔隙部分或全部为砂粒所充填;砂粒组成的孔隙部分地为黏土颗粒所充填。七东1区克下组不同分区岩心样品的扫描电子显微镜及铸体薄片鉴定资料统计结果表明:(1)砾岩储层的孔隙类型在不同分区表现出多种孔隙类型兼备的特点;(2)孔隙结构受沉积及成岩后生作用控制,不同岩性、不同区块储层的主要孔隙结构类型及特征存在显著差异。

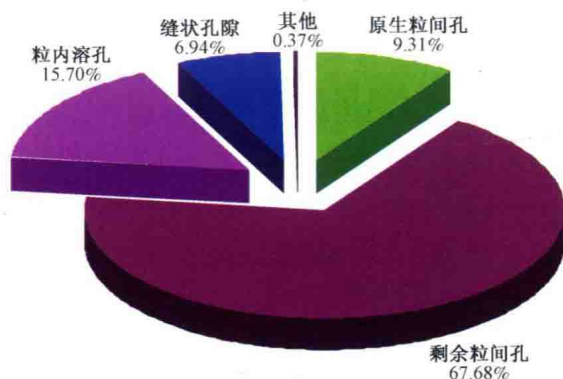
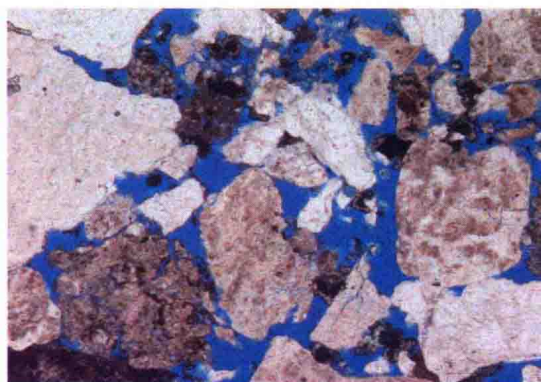


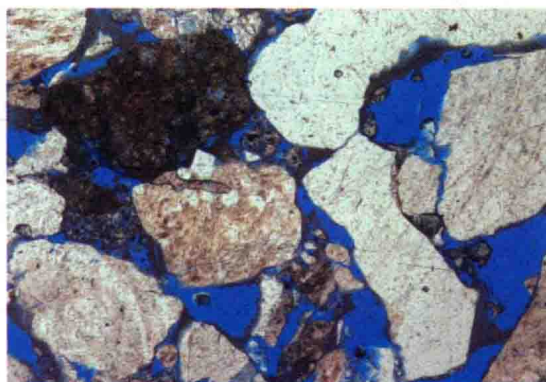
图 2-2 七东 1 区克下组不同孔隙类型

1. 孔隙类型

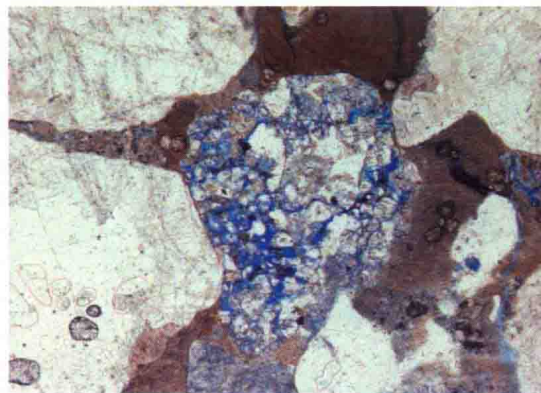
砾岩储层的孔隙类型具有原生孔隙与次生孔隙并存的特点。一般受成岩后生变化影响较弱的储层,以原生的粒间孔为主;当受后生变化影响较强时,以次生的溶蚀孔为主。根据镜下观察统计可知,七东 1 区克组油藏储层主要以剩余粒间孔为主,占 67.68%;其次为粒内溶孔,占 15.70%;微孔、砾缘缝、微裂缝等占 7.27%。不同类型的孔隙结构特征如图 2-2、图 2-3 所示。



(a) 含砾不等粒砂岩, 以原生粒间孔和剩余粒间孔为主
(T71839井, 1405.48m)



(b) 砾质不等粒砂岩, 以剩余粒间孔为主
(T71911井, 1145.25m)



(c) 砂质砾岩, 以粒内溶孔为主
(T71740井, 1212.14m)



(d) 砂质砾岩, 以微裂缝和粒内溶孔为主
(T71740井, 1230.47m)

图 2-3 储层微观孔隙结构特征

2. 喉道类型

喉道是指在孔隙之间起沟通作用的狭窄部分。常见喉道类型有:(a)缩颈状喉道:喉道是孔隙的缩小部分;(b)点状喉道:可变断面收缩部分是喉道;(c)片状喉道;(d)弯片状喉道;(e)管束状喉道(图 2-4)。七东 1 区克下组储层喉道以缩颈状喉道、片状喉道和弯片状喉道为主(图 2-5)。

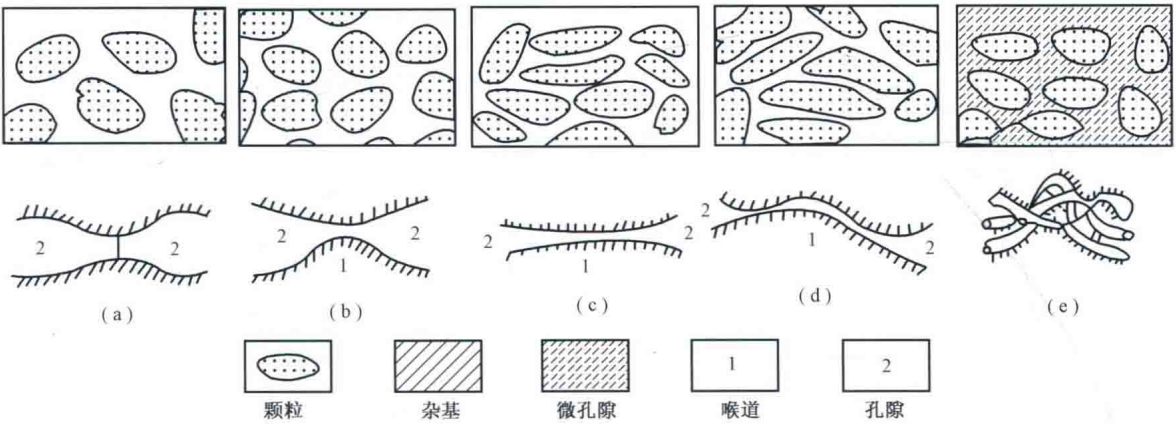


图 2-4 喉道类型模式

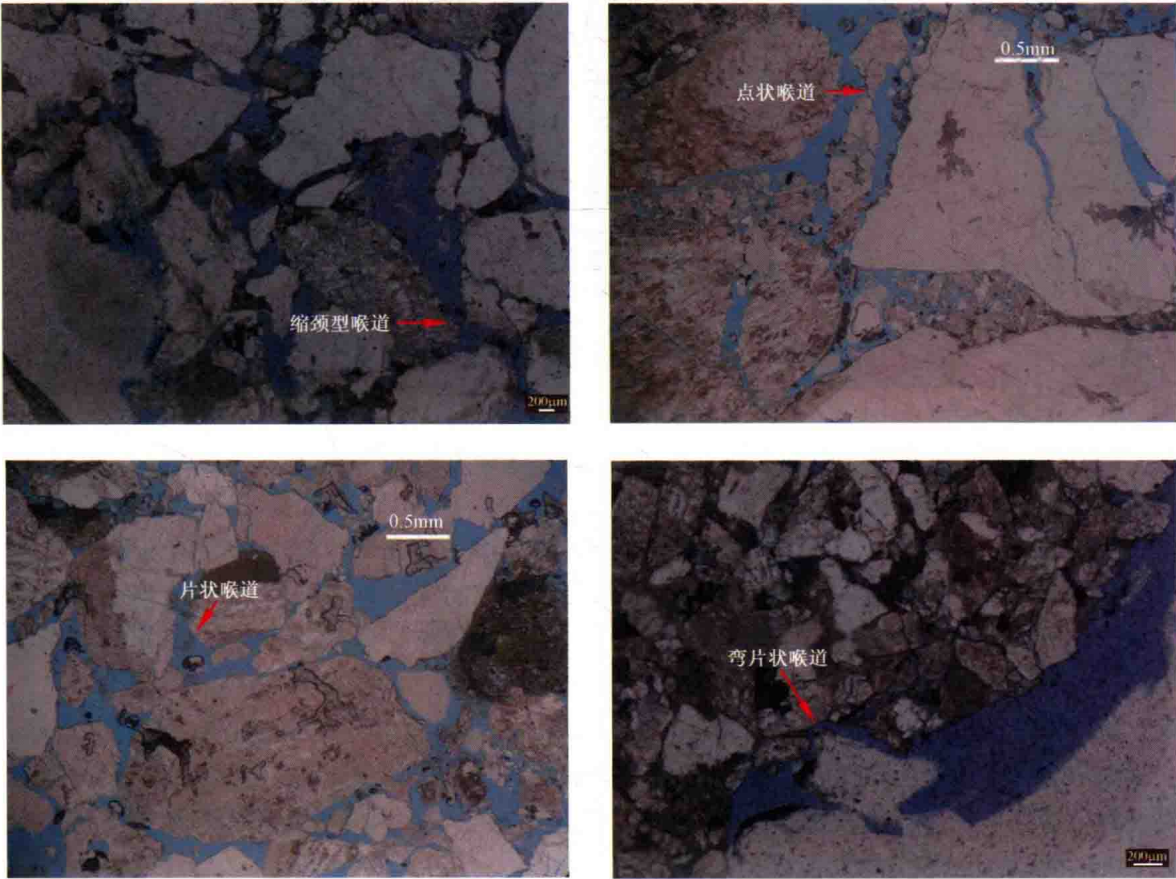


图 2-5 七东 1 区克下组储层喉道类型