

中国东部主力油田 三次采油技术论文集

孙焕泉 程杰成 王增林 主 编



石油工业出版社

内 容 提 要

本论文集精选了大庆油田和胜利油田于2006年联合召开的“中国东部油田三次采油技术研讨会”的论文13篇。这些论文从不同侧面反映了我国东部主力油田三次采油技术的发展现状、应用水平和发展方向。

本书可供油气田开发系统的研究和技术人员以及石油院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国东部主力油田三次采油技术论文集/孙焕泉,程杰成,王增林主编.
北京:石油工业出版社,2007.7

ISBN 978-7-5021-6166-8

I. 中…

II. ①孙…②程…③王…

III. 二次采油-学术会议-文集

IV. TE357.4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 105545 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)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技排版中心

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2007年7月第1版 2007年7月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:12.75

字数:323千字 印数:1—1000册

定价:42.00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

《中国东部主力油田三次采油技术论文集》

编 委 会

主 编：孙焕泉 程杰成 王增林

副主编：刘建民 吴军政 李振泉 汪庐山

编 委：(按姓氏笔画排序)

王 锋 王友启 尹中民 方洪波 白文广

石志成 吴军政 宋新旺 张爱美 李 洋

李希明 束青林 杜荣光 杨振宇 陈 鹏

侯兆伟 赵劲毅 郭兰磊 曹绪龙 鄂金太

前 言

以大庆油田和胜利油田为代表的东部老油田已整体进入高含水后期开发阶段,面临着持续稳定发展的巨大压力和严峻形势。三次采油技术已经成为老油田的主导开发技术,为近几年油田的发展作出了重要贡献,但三次采油技术本身的发展、应用受到诸多因素的制约,面临着技术发展和扩大应用规模的难题。大庆油田和胜利油田是中国东部主力产油区,共同承担着石油工业发展的重任,两大油田的三次采油技术代表了中国乃至世界三次采油技术的最高水平,代表了老油田强化采油技术的发展方向。本着相互启发、共同促进的原则,大庆油田和胜利油田联合召开了“中国东部油田三次采油技术研讨会”。两大油田的开发工作者及国内知名的三次采油技术专家共同研讨了三次采油的技术问题,回顾了两大油田三次采油技术的发展历程、工作成果和实践经验,分析了三次采油面临的形势,并就一些关键技术、热点难点问题及发展方向进行了研讨。

为便于学习和推广应用大庆油田和胜利油田三次采油技术,精选了会上交流的 13 篇论文汇编成《中国东部主力油田三次采油技术论文集》。这些论文从不同侧面反映了我国东部主力油田三次采油技术的发展现状、应用水平和发展方向。内容涉及聚合物驱、三元复合驱、二元复合驱、泡沫复合驱和微生物驱技术的实验研究及矿场实践等多个方面,既有前沿技术和突破性创新成果的展示,又有典型做法和成功经验的总结提升,具有很强的指导意义。

本论文集内容翔实,资料丰富,图文并茂,必将为进一步提高三次采油技术水平起到承前启后、抛砖引玉的作用,对从事油田开发科研与生产人员及有关院校师生有参考价值。

本书编委会

2007 年 5 月

目 录

胜利油田三次采油技术及研究进展	曹绪龙	元福卿等(1)
大庆油田高浓度聚合物驱技术研究	吴军政	苏延昌等(28)
大庆油田进一步提高工业化聚合物驱效果的几点做法	陈 鹏	邵振波等(34)
高温高盐砂岩油藏化学驱油技术研究	郭兰磊	宋新旺等(47)
大庆油田三元复合驱技术发展现状	李 洋	王海峰等(61)
二元复合驱油技术室内研究进展	鄂金太	李佰广等(76)
二元驱油体系的研究及配方设计	张爱美	曹绪龙等(85)
聚合物驱后泡沫复合驱试验研究	石志成	舒方春等(98)
聚合物驱后油藏提高采收率技术研究	宋新旺	曹绪龙等(103)
大庆油田微生物采油技术研究与应用	侯兆伟	石 梅等(119)
胜利油田微生物驱油技术研究与应用	李希明	宋永亭等(145)
胜利油田三次采油地面工艺技术进展	方洪波	邢爱忠等(159)
孤岛油田聚合物驱实践及提高采收率新思路	束青林	张本华等(180)

胜利油田三次采油技术及研究进展

曹绪龙 元福卿 姬奥林

(胜利油田有限公司地质科学研究院)

摘 要 回顾了胜利油田的三次采油技术发展历程,客观描述了三次采油现状和效果。针对三次采油技术发展面临的主要问题,通过大力加强基础理论研究,丰富发展了聚合物驱油理论,并基本形成聚合物加合增效理论。在此理论的指导下,针对胜利油田不同的油藏条件分别开发形成三个新的驱油体系和方法,并开展了矿场先导试验,取得了突破性进展,在三次采油接替技术和储备技术方面取得重大进展,夯实了三次采油持续发展技术基础。

关键词 三次采油 聚合物驱 二元复合驱 泡沫驱 有机交联聚合物驱

三次采油技术可以有效改善油田的开发效果,增加可采储量,是水驱油田开发后期提高原油采收率的一个重要手段。

胜利油田在 20 世纪 60 年代就开始了三次采油的室内试验研究工作,至 90 年代初,已开发油田大都进入“三高”开发阶段,水驱稳产难度越来越大。1992 年分别在孤岛油田中一区 Ng_3 和孤东油田七区西 Ng_5^{2+3} 开展聚合物驱油先导试验和小井距三元复合驱先导试验,取得了突破性的进展。在先导试验取得巨大成功的基础上,1994—1995 年开展了孤岛中一区 Ng_3 、孤东七区西 Ng_5^{2+3} 两个聚合物驱扩大试验,这两个扩大试验也取得了明显的降水增油效果。四个化学驱油试验单元的实践证明,胜利油区进行三次采油效果明显,是特高含水油田降水增油、增加可采储量的有效途径之一,因此,1997 年在孤岛、孤东油田进行聚合物驱工业化推广应用,同时开展了三元复合驱扩大试验。

随着化学驱油规模的不断扩大,到“十五”末胜利油区适合三次采油的优质资源所剩无几,大批三次采油单元转水驱后,剩余油分布更加零散,大孔道更加严重,没有进一步大幅度提高原油采收率的技术。因此需要不断深化三次采油技术基础研究,加大新技术新方法的研究和矿场应用。

一、现状及面临的形势

(一)概况

胜利油田经过 30 多年的开发,大部分油田已进入特高含水期,特别是主力油田面临含水高、采出程度高、采油速度高的开发形势。几个主力油田,如孤岛、孤东、胜坨等油田综合含水都在 90% 以上,开发稳产难度增大,常规注水开发技术难以减缓产油量递减,稳产形势比较严峻。但胜利油田水驱标定采收率相对较低,仅为 28.8%,即水驱后油层中仍有丰富的剩余油

和较大的开发潜力。在这种形势下,要增加可采储量和提高原油产量,必须寻求新的开发技术。

EOR 资源评价结果表明,胜利油田适合三次采油的总资源为 $10.76 \times 10^8 \text{t}$,占已注水开发单元地质储量的 45.4%,资源十分丰富,潜力巨大,进行三次采油有丰富的物质基础。

胜利油区适合三次采油油藏与三次采油有利条件相比,明显存在诸多不利因素(表 1),突出表现在地层温度高、原油粘度高、综合含水高、淡水资源紧张、注入污水矿化度高、大孔道等动态非均质严重、常规井网且井况较差等。例如,胜利油田油层温度大于 65°C ,地下原油粘度一般在 $50 \sim 130 \text{mPa} \cdot \text{s}$,地层水矿化度大于 5000mg/L ,并且胜利油田淡水资源缺乏,采用污水配注的注入方式,配制水矿化度较高,这些不利因素对驱油剂和驱油体系的耐温性、抗盐性以及增粘性提出更高要求。另外,胜利油田三次采油单元油藏综合含水大于 93%,油藏非均质严重,并且利用常规注水开发老井网,注采完善程度及井况较差,这些不利因素对油藏再认识和精细选区、剩余油分布及油藏前期调整提出更高要求。所有以上不利因素使胜利油田三次采油开发的难度增大,因此必须加大攻关研究,以形成适应胜利油田油藏条件的三次采油技术。

表 1 三次采油条件对比表

项 目	有利条件	胜 利
地层温度($^\circ\text{C}$)	40 ± 10	>65
配置水矿化度(mg/L)	<1000	淡水紧张,污水 >5000
含水(%)	低含水	93 ~ 98
地下原油粘度($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	<60	50 ~ 130
动态非均质	无大孔道	大孔道较普遍

胜利油田不但整体三次采油条件较差,而且其自身油藏条件也存在较大的差异。根据地下原油粘度、油层温度和地层水矿化度等资源分类标准,将适合的三次采油资源划分为四类(表 2):一类油藏地层温度小于 70°C ,地层水矿化度小于 10000mg/L ,地质储量为 $27230 \times 10^4 \text{t}$;二类油藏地层温度 $70 \sim 80^\circ\text{C}$,地层水矿化度 $1 \sim 20000 \text{mg/L}$,地质储量为 $26772 \times 10^4 \text{t}$;三类油藏地层温度 $80 \sim 93^\circ\text{C}$,地层水矿化度大于 30000mg/L ,地质储量为 45707×10^4 ;四类单元地质储量为 $7940 \times 10^4 \text{t}$,主要是因为存在边底水、大孔道、井况不好及油层连通差等突出矛盾而从一至三类中划分出的单元。

三次采油资源动用原则是先易后难、规避风险,即首先动用油藏条件相对较好的一类资源,取得成功后再依次动用二类,同时攻关三类高温高盐油藏资源,以最大限度减少三次采油风险。

表 2 胜利油田聚合物驱资源评价结果

分类评价标准				分类评价结果	
类别	原油粘度 (mPa · s)	地层温度 (℃)	地层水矿化度 (mg/L)	单元个数	地质储量 (× 10 ⁴ t)
一	<70	<70	<1 × 10 ⁴	18	27230
二	70 ~ 80	70 ~ 80	1 × 10 ⁴ ~ 3 × 10 ⁴	24	26772
三	80 ~ 100	80 ~ 93	3 × 10 ⁴ ~ 10 × 10 ⁴	85	45707
四	边底水、大孔道、井况不好、油层连通差			16	7940
合 计				143	107649

(二)三次采油发展历程

胜利油田三次采油首先进行室内试验研究,研制适合油藏条件的驱油配方,在基础理论研究和配方设计基本成熟的前提下,开展单井试验,探索驱油体系的注入性能、合理的注入工艺和注入方式,先导试验的目的主要是验证驱油技术的可行性,一般选取油藏和水驱开发有代表性的区块实施,以便在较短的时间内见到驱替效果;扩大试验的目的主要证实技术的经济可行性和推广应用的可能性;在先导试验和扩大试验取得成功之后,即可进行大规模的工业化推广应用。

胜利油田三次采油工作主要经历了四个阶段。

1. “七五”以前为技术探索阶段

先后开展过稠化水驱、碱水驱、 CO_2 驱等三次采油技术的室内研究和小规模现场试验,探索适合胜利油田的三次采油技术,并确定了以聚合物驱作为三次采油主攻技术,并着手开展技术攻关。

2. “八五”期间为技术试验阶段

在一系列室内试验研究的基础上,1992 年胜利油田开展了“孤东油田小井距 Ng_5^{2+3} 层三元复合驱先导试验”和“孤岛油田中一区 Ng_3 聚合物驱先导试验”。

孤东油田小井距(注采井距 50m)三元复合驱先导试验属国内首例。该项目在累计注水 5.1PV、水驱采出程度 54.4%、中心井含水持续三年 98% 以上的条件下,取得了显著的降水增油效果,综合含水下降 22.1%,日产油增加 6.7 倍,提高采收率 13.4%,项目达到国际领先水平。孤岛油田中一区 Ng_3 聚合物驱先导试验也取得了明显效果。试验区包括 4 个注采井组,储量 $165 \times 10^4 \text{t}$,注聚合物后综合含水下降 19.2%,日产油增加 1.7 倍,提高采收率 12%,吨聚合物增油 143t。这两个先导试验的成功验证了胜利油田利用化学驱技术提高采收率的矿场适用性,坚定了进一步深化三次采油工作的信心。

为了研究大面积、常规开发井网、特高含水期聚合物驱工业化推广的技术经济可行性,1994 年又在孤岛中一区 Ng_3 和孤东七区西 Ng_5^{2+3} 分别开展了 34 和 40 个井组的注聚合物扩大试验,1997 年在孤岛西区开展三元复合驱扩大试验。

孤岛西区三元复合驱扩大试验采用常规井网,包括 6 个注采井组,储量 $197 \times 10^4 \text{t}$,实施后综合含水下降 11.8%,日产油增加 1.5 倍,已累计增油 $23.9 \times 10^4 \text{t}$,提高采收率 12.12%,预计最终可提高采收率 14%(图 1)。三个扩大试验累计增油 $219 \times 10^4 \text{t}$,平均已提高采收率 11.1%。扩大试验不但证实了馆陶组油藏开展化学驱的技术经济可行性,更为重要的是,试验过程中逐步形成和配套了适合胜利油田特点的化学驱技术,为工业化推广应用创造了条件。

3. “九五”期间为技术推广阶段

“九五”期间,共推广应用 9 个单元,覆盖地质储量 $1.2 \times 10^8 \text{t}$,到目前这 9 个单元已增油 $674.5 \times 10^4 \text{t}$,提高采收率 5.4%,预计增加可采储量 $872 \times 10^4 \text{t}$,提高采收率 7.0%。

孤岛中二南中注聚合物区地质储量 $1185 \times 10^4 \text{t}$,设计注入井 37 口,生产井 84 口,地层温度 70.5℃,地层水矿化度 5797mg/L,地层原油粘度 85mPa·s,实施前采出程度 38.0%,综合含

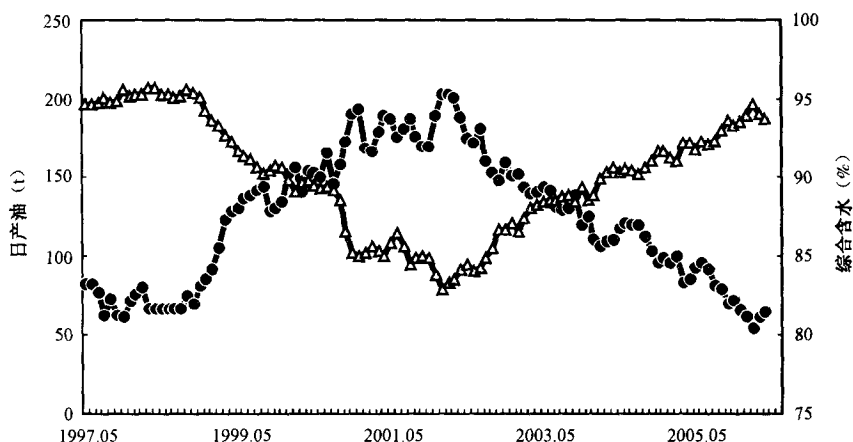


图1 孤岛西区三元复合驱扩大试验生产曲线

水 95.0%。1998 年投注,综合含水由实施前的 94.9% 下降至 80.9%,日产油水平由 493t 增加到 1193t,累计增油已达 111.2×10^4 t,提高采收率 9.4%,预计最终可提高 11%(图 2)。

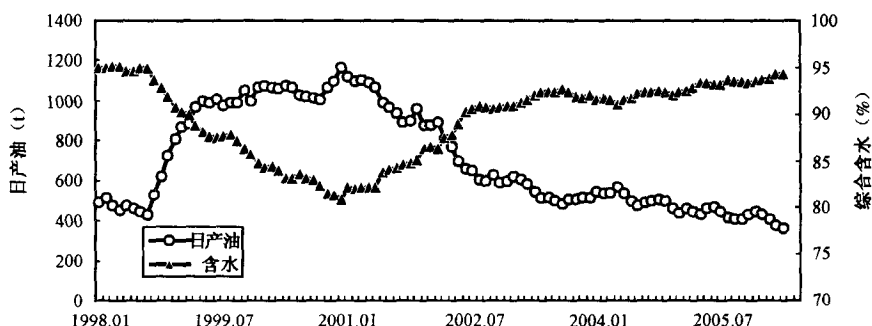


图2 孤岛中二南中注聚合物区生产曲线

油田三次采油年增油量从 1995 年的 4×10^4 t 跃升到 1999 年的 101×10^4 t,2000 年达到 133×10^4 t,“九五”阶段增油 346×10^4 t。化学驱油技术成为整装主力油田提高采收率、减缓产量递减的主要技术手段之一。

4. “十五”以来为攻关新类型阶段

针对三次采油后备资源特点和聚合物驱后进一步提高采收率的技术需求,“十五”期间加大了新技术、新方法的攻关研究力度,形成了三次采油技术多系列共同发展的局面。

化学驱技术方面,配套完善了二类油藏聚合物驱油技术,为解决三类高温高盐油藏、四类大孔道油藏和聚合物驱后提高采收率的难题,研制了多种新型组合式驱油体系,开展了孤东油田七区西南二元复合驱、埕东西区泡沫复合驱、胜坨油田坨 11 南高温高盐油藏有机交联聚合物驱、东辛油田辛 50 有机金属交联聚合物驱等四个先导试验。

20 多年来,胜利油田三次采油从无到有、由小到大,走过了一段思想不断解放、认识逐步深化、创新能力持续提升的艰苦创业历程,闯出了一条具有胜利特色的三次采油发展之路。

(三)实施现状与效果

1. 实施现状

截至2006年5月,胜利油田在孤岛、孤东、胜采、河口、桩西等油田共投入化学驱单元30个,累计动用储量 $31794 \times 10^4 \text{t}$ (图3),其中聚合物驱投入单元26个,动用地质储量 $31193 \times 10^4 \text{t}$;复合驱4个,动用地质储量 $601 \times 10^4 \text{t}$ 。正注单元14个,地质储量 $13750 \times 10^4 \text{t}$;后续水驱单元11个,地质储量 $15714 \times 10^4 \text{t}$;已结束单元5个,储量 $2330 \times 10^4 \text{t}$ 。有注聚合物井488口,日注聚合物溶液 51766m^3 ,生产井2105口,日产油9422t,含水92.5%。

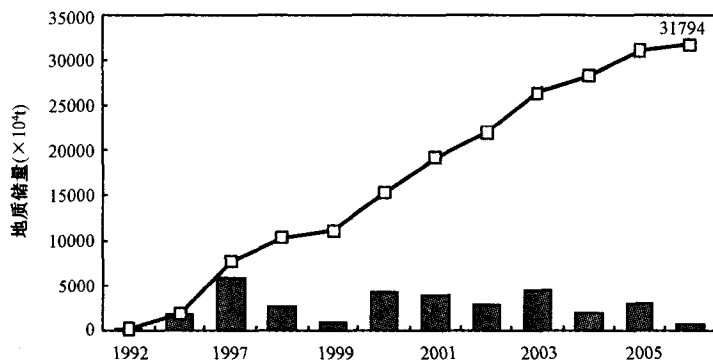


图3 三次采油储量投入曲线

2. 效果与效益

三次采油取得显著的增油效果,2005年年增油达到 $169.3 \times 10^4 \text{t}$,年产油近 $400 \times 10^4 \text{t}$,累计增油 $1179 \times 10^4 \text{t}$ (图4)。

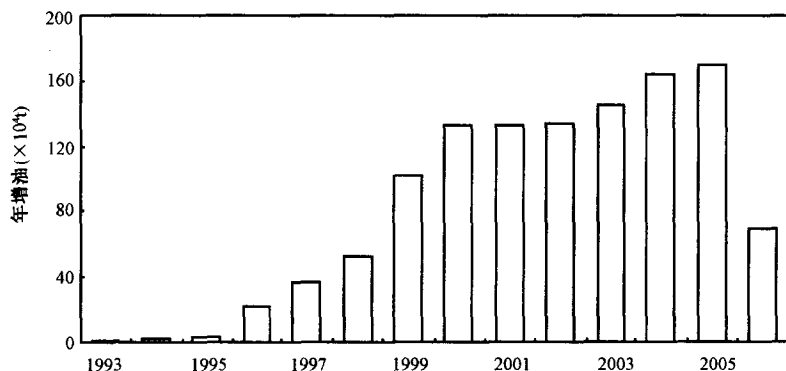


图4 三次采油增油曲线

从整个胜利油区产油量构成图也可以看出(图5),实施化学驱后,胜利油区的产油量大幅度上升,弥补整个胜利油区水驱产量递减4个百分点,反映出化学驱项目增油效果明显,在整个油区的开发中发挥了重要的作用。

从孤岛油田综合含水变化曲线可以看出(图6),如果不实施化学驱,整个油田的含水是持续上升的,而实施化学驱后,整个油田的含水却明显下降,大大改善了孤岛油田的开发形势。

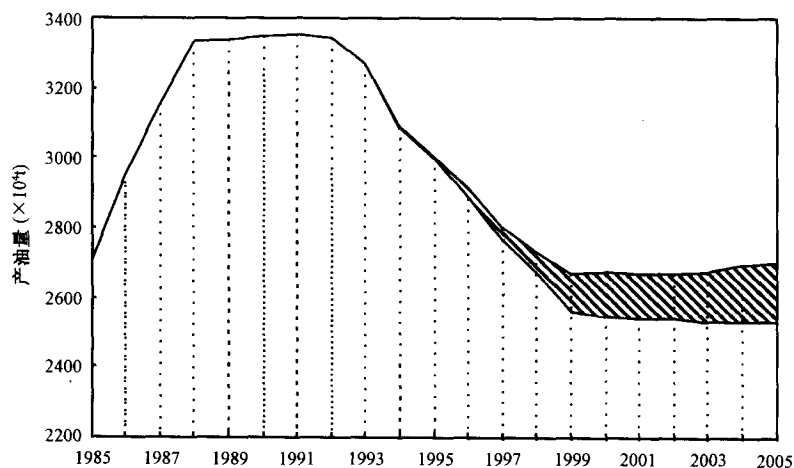


图5 胜利油区产油量构成图

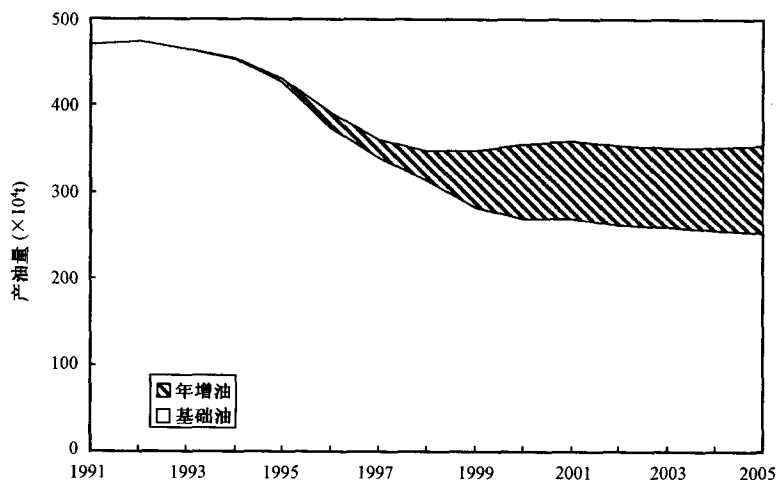


图6 孤岛油田产量构成图

从全油区及主力油田化学驱储量比例及产量比例可以看出，三次采油已成为增储稳产的主要手段之一。胜利油区化学驱储量占油区动用储量的7.8%，而产量占油区产量的13.4%，其中孤岛油田化学驱储量占油田动用储量的41.8%，而产量占油田产量的59%；孤东油田化学驱储量占油田动用储量的25.7%，而产量占油田产量的31%（表3）。

表3 化学驱在油田开发中的作用表

比 例	孤岛油田	孤东油田	全油区
储量比例(%)	41.8	25.7	7.8
产量比例(%)	59	31	13.4

采用“增量法”对3个试验项目和3个投入较早的工业化项目进行经济后评估，结果表明在油价为18\$/bbl时经济极限吨聚合物增油49.6t，在油价为26\$/bbl时经济极限吨聚合物增油33.5t，在油价为40\$/bbl时经济极限吨聚合物增油21.1t（表4）。

表 4 经济极限吨聚合物增油表

主要变化因素	油价(\$/bbl)					
	18	23	26	30	35	40
孤岛 Ng ₃ 先导区(t)	66.5	50.6	44.9	38.6	32.6	28.2
孤岛 Ng ₃ 扩大区(t)	55.5	42.3	37.5	32.2	27.2	23.6
孤东 Ng ₅ ²⁺³ 北部(t)	45.3	34.5	30.6	13.8	22.2	19.3
孤岛 Ng ₄ (t)	40.9	31.1	27.6	23.8	20	17.4
孤东八区(t)	40.4	30.7	27.2	23.4	19.8	17.2
飞雁滩(t)	48.7	37.1	32.9	28.3	23.9	20.7
平均(t)	49.6	37.7	33.5	26.7	24.3	21.1

已结束的 5 个三次采油项目,累计增油 199×10^4 t,平均提高采收率 8.5%,累计注入聚合物干粉 19877 t(折算),平均吨聚合物增油 100 t。即使以原油价格为 18\$/bbl 评价,经济效益非常显著(表 5)。

表 5 已结束单元吨聚合物增油统计表

单 元	地质储量($\times 10^4$ t)	累注干粉(t)	累增油($\times 10^4$ t)	吨聚合物增油(t)
孤岛注聚合物先导区	165	1389	20	143
孤岛注聚合物扩大区	1078	8775	121	137
孤东小井距三元复合驱	8	282	2	73
孤东注聚合物扩大区	692	6199	46	74
孤东七区西 Ng ₅ ²⁺³ 南	387	3232	10	31
合 计	2330	19877	199	100

已转后续水驱项目 11 个,覆盖地质储量 15714×10^4 t,累计注入聚合物干粉 169587.5 t(折算),累计增油已达 772.7×10^4 t,平均吨聚合物增油已达 45.6 t,项目结束后预计吨聚合物增油可达 69 t。正注项目 14 个,覆盖地质储量 13750×10^4 t,累计注入聚合物干粉 95668.2 t(折算),累计增油已达 208.1×10^4 t,平均吨聚合物增油已达 21.8 t,项目结束后预计吨聚合物增油可达 67 t。

3. 形成一、二类油藏化学驱配套技术

经过“八五”、“九五”的攻关和“十五”的推广,形成了具有胜利特色的化学驱配套技术,适合高温、高含水、高矿化度、高采出程度、油层非均质严重及常规井网污水配注条件下的中高粘度油藏。配套技术主要包括室内试验技术、方案设计与优化技术、注采工艺技术、动态监测和跟踪调整技术、效果综合评价技术等配套系列,并且在孤岛、孤东、胜采等油田开展了大规模的工业化推广应用,取得了显著的降水增油效果,在老油田大幅度提高已探明储量采收率的技术方面走出了一条新路,为胜利油田的持续稳定发展提供了强有力的技术和经济支撑。

1) 室内实验技术

通过近 40 年的攻关,形成具有国内领先水平的室内试验技术,主要包括主要制剂的研制及评价技术、室内及矿场监测技术、油藏条件下物理模拟技术和驱油机理研究技术等。

如长岩心物理模拟装置主要用于研究三次采油效果的评价,优化各种注入参数,包括注入

速度、注入方式、注入量、注入时机等因素对三次采油效果的影响,为数模和方案编制提供重要的依据和指导。整套系统的压力可达 60MPa,计量精度为 $0.1\% F \cdot S$;温度可达 150°C ,计量精度为 0.1°C ;使用岩心为实际地层岩心或人造岩心,长度 $1 \sim 2\text{m}$,直径 50mm 或 25mm,可以模拟 $0 \sim 90^{\circ}$ 的地层倾角;油气水的注入系统采用美国 ISCO 公司生产的微量高压柱塞泵,注入速度最低可达 $0.001\mu\text{L}/\text{min}$ 。所有的压力、压差、温度传感器和控制仪表全部采用进口器件,精度高,性能可靠,实现了全过程的自动化控制。

CT 层析技术主要用于监测三采过程中流体分布及前缘推进,三采过程中岩心孔隙结构变化等。X-射线 CT(简称 X-CT 或 CT)全称为 X 射线计算机层析成像技术,它是借助电子计算机将 X 射线断层扫描装置扫描的断面再现出来的一种全新的 X 射线成像技术,可以无损地检测非透明物体的组成及结构。

目前,国内只有胜利油田利用专门的工业 CT 机进行储层研究。经过开发微焦点工业 CT 系统,利用体积 CT 多次扫描三维重建技术,一次扫描可以重建最多 100 个切片,从而完成一个三维立体的重建,扫描速度明显高于切片 CT,保证了岩心驱替不停泵连续测试,探索了利用体积 CT 扫描聚合物驱替的试验方法和过程,应用 CT 切片重建油水流动状态和剩余油分布状态及其如何对获得的切片数据进行处理,研究化学驱过程中油水饱和度分布及油水驱替状况。

2) 方案设计与优化技术

主要包括精细油藏描述技术、注聚合物前油藏调整技术、数值模拟技术及参数优化技术等。

(1) 精细油藏描述技术。

三次采油阶段的油藏大多已进入高含水的产量递减阶段。由于储层非均质特征的差异性、屏障性、敏感性及变化的随机性,加之井网的不完善性,导致油水推进在纵、横向上的不均一及油层动用的差异,剩余油分布零散。同时,在长期水淹的储层中,储层及流体性质都将发生一系列物理的、化学的及机械的变化。以上这些因素使油藏各方面的非均质性更加突出。因而,这一阶段的油藏描述将以储层非均质变化特征为基础,以剩余油分布规律为核心,以储层、油藏的定量评价为目的,运用地质综合分析技术、水淹层测井解释技术、精细油藏数值模拟技术、油藏工程综合分析技术等四大技术,建立地层模型、构造模型、储层模型、流体模型和油藏模型。而三次采油中精细油藏描述的重点是储层的非均质性及剩余油分布研究。

在现场实施过程中发现,高渗透条带的存在严重影响三次采油的驱油效果,窜聚合物是影响注聚合物效果的主要因素之一。窜聚合物井的主要特点是聚合物合物驱见效快,但含水下降幅度并不是很大。且油井失效也快,一旦出现窜聚合物情况,含水便迅速上升,聚合物驱效果消失。因此如何在注聚合物前及时发现高渗透条件,以及时在注聚合物前采取封、堵、调等措施,是聚合物驱精细油藏描述的关键。通过多年的攻关研究,目前已形成了成套的高渗透条带识别技术,主要包括生产动态分析、PI 决策技术、示踪剂测试和试井分析方法等。

(2) 注聚合物前油藏调整技术。

加强注聚合物前油藏调整是三次采油取得好效果的前提。胜利油田油藏非均质性强,由于长期水洗,使油层纵向和平面非均质性加剧,油水井间大孔道现象普遍存在,油水井间高渗透条带发育,存在层间窜和层内窜的现象。孤东注聚合物区示踪剂检测结果表明,示踪剂水线推进速度最小为 $0.94\text{m}/\text{h}$,最快为 $2.79\text{m}/\text{h}$,油层非均质性强,存在“舌进”或“指进”现象。另外,进入特高含水期的油田,由于油层发育、井网布置等原因,普遍存在局部注采井网不完善、

井况差等问题。同时由于长期强注强采,地层压力普遍较高,而且单元和各井区间存在地层压力不均衡现象,给注聚合物过程中注聚合物井正常注入和平面的注采平衡造成了困难,同时将严重影响注聚合物驱油效果的正常发挥。

因此,在矿场实施之前,应加强前期油藏调整工作。所采用的技术方法是:降水提液、油水井复射、油井补孔归位、堵水调剖、更新油水井等,达到增加注入能力,减少剪切,封堵大孔道,完善井网,提高注采对应率等目的。

孤东八区在注聚合物之前,强化注聚合物前的油藏准备工作,编制并实施了调剖堵水及降水降压的油藏准备方案。对水井适当降低注水量,对采油井进行提液,并对需堵水调剖的油水井进行堵水调剖,水井作业井数 43 口,油井作业井数 36 口。方案实施后,日注量由 9285m^3 下降到 6550m^3 ,地层压力下降了 1.07MPa ,实现由水驱强注强采向聚合物驱的顺利过渡。结果表明,注聚合物前的油藏准备工作的实施见到了良好的效果,孤东八区综合含水比注聚合物前最大下降了 13.6%,80% 以上的油井含水下降,聚合物驱油效果十分显著。

(3) 数值模拟技术。

数值模拟在三次采油中具有特殊重要的地位,不仅可以优化三采注入参数,对方案实施效果进行预测,还可以在方案实施后进行跟踪拟合及预测,指导矿场生产,同时,数值模拟具有速度快、准确度高、经济方便等优点。通过引进、修改、研制,目前拥有 VIP - PLOYEM、SLCHEM、CMG、UTCHOM、FAPMS、FACS、ECLIPS 等模拟器,用于聚合物驱、二元复合驱、三元复合驱、泡沫复合驱和各种交联聚合物驱等项目方案优化设计和矿场跟踪数值模拟研究。

(4) 参数优化技术。

参数优化是三次采油方案设计的关键,只有优化出适合本地区的设计参数,才能保证项目取得良好的驱油效果。在胜利油田聚合物驱先导试验和扩大试验阶段,由于刚开始实施注聚合物,经验相对较少,因此参数优化相对较简单,仅以综合指标(提高采收率与注聚合物利用率的乘积)进行简单的优化,即综合指标最大的方案为最佳方案。但随着工业化推广规模的扩大和参数优化经验的丰富,经济指标也加入到参数优化中来,优化依据不仅考虑增油量、提高采收率等技术指标,同时考虑内部收益率、财务净现值等经济指标,工业化推广单元注聚合物参数优化方法主要包括正交设计及模糊综合评判法。参数优化越来越科学合理。

正交设计法是一种研究多因子试验问题的重要数学方法,它主要使用正交表这一工具来进行整体设计、综合比较和统计分析。选取聚合物浓度、段塞尺寸、注入速度等多个因子作为考察对象,每个因子按多种水平进行试验,可以设计出最小试验个数的正交设计分析。模糊综合评判是在模糊的环境中,考虑了多种因素的影响,出于某种目的对某事物作出的综合决断或决策。根据模糊综合评判结果,可以优化出最佳注入浓度、最佳注入段塞尺寸、最佳用量和最佳注入方式等。

3) 注采工艺设计技术

根据注聚合物工程的特性及对地面工艺的要求,经过不断的探讨、改进,在引进、吸收、消化国外技术的基础上,采用了多种新工艺、新技术,研制了分散、转输、熟化(搅拌)、倒罐、储存、喂入、升压、高压混配注入的单泵对单井的注入工艺流程。整个注入系统全开放、无节流,最大限度的减少了聚合物溶液在流动过程中的粘度损失。

在设备国产化率、设备运行的可靠性方面,各项技术指标都达到了国内领先水平,并形成了从工程设计、施工到现场管理的一套注聚合物工艺优化设计技术,既满足了生产的要求,又节约了工程投资。

4) 动态监测和跟踪调整技术

聚合物驱的驱替介质已由传统二次采油的牛顿流体转变成非牛顿流体,致使流体在多孔介质中的界面化学性质、流变性和渗流力学规律都发生了明显的变化,传统的生产测井仪器测量误差增大,已满足不了注聚合物开发的需要。近年来,根据三次采油生产的需要,一方面完善、改进现有测井、测试工艺,另一方面积极探索新的监测方法,形成了一套具有三次采油特色的动态监测技术,主要包括地层参数测井、工程测井、注入剖面测试、试井等。其中,聚合物驱非牛顿流体试井方法的开发和应用,为聚合物驱动态监测提供了重要手段,填补了国内空白。

由于聚合物驱提高采收率技术的复杂性,矿场实施后,会遇到各种各样的新问题,因此在实施过程中,应密切注意动态变化。动态分析要做到注聚合物动态分析和静态分析的结合,注聚合物动态分析和注水动态分析的结合,见效分析和见聚合物分析的结合,油藏、井筒和地面分析的结合,根据动态变化情况,及时对原方案进行调整,排除干扰因素,保证驱油效果向好的方向发展。跟踪调整技术主要包括油井提液、边角井治理、后续水驱综合治理、单井配注调整等技术。

4. 开采效果评价技术

通过研究及实践,建立了三次采油效果综合评价技术。该技术包括技术评价和经济评价两个方面。

增油量计算是利用单井见效前一段时间内的生产动态数据,预测目前某一时刻不改变开采方式下的水驱产量,该井的实际产量与预测的水驱产量的差值作为阶段增油量。采用如下四种方法进行阶段增油量计算:累计液油比—累计产液外推法、产量递减预测法、累计产液—累计产油外推法、净增油计算法。

经济评价方法采用“增量法”,直接计算聚合物驱油“增量”的效益和费用,即通过对聚合物驱后增加的收入、节省的费用以及增加的投资和费用进行综合对比分析,计算增量评价指标,以判别目前及最终的经济效益。

(四)存在的主要问题

1. 资源接替及三、四类油藏提高采收率

二次化学驱潜力评价结果表明,胜利油田有适合三次采油资源 $10.76 \times 10^8 \text{t}$,其中一、二类储量 $5.4 \times 10^8 \text{t}$ 。目前已动用储量 $3.18 \times 10^8 \text{t}$,但潜力评价时对入选单元总体考虑,而同一单元内部,由于油层发育、连通差,井况差,原油粘度高,地层水矿化度高等原因,部分井组不适合三次采油,已实施单元占用资源量达 $4.8 \times 10^8 \text{t}$,平均利用率只有 65%,到目前胜利油区剩余的一、二类资源仅 $0.6 \times 10^8 \text{t}$ 。

因此,要保持三次采油增油量的稳定,在目前的资源条件下,三类资源将是下步的主阵地。胜利油田有适合三次采油的三类资源 $4.57 \times 10^8 \text{t}$,占总资源量的 42.5%,这类资源地层温度高 ($>80^\circ\text{C}$),地层水矿化度高 ($>20000 \text{mg/L}$),而目前应用的聚丙烯酰胺的耐温抗盐性能较差,还不能适应三类油藏化学驱的需要。

2. 聚合物驱后油藏进一步提高采收率

到目前胜利油田有转后续水驱储量 $18044 \times 10^4 \text{t}$,占实施三次采油储量的 58%,随着注聚合物规模的不断扩大,转后续水驱储量将越来越多,预计到 2010 年转后续水驱储量将达到 $3.7 \times 10^8 \text{t}$ 。

胜利油田三次采油项目主要集中的孤岛、孤东、胜坨三大主力油田的平均水驱采收率

33.5%,化学驱提高采收率按7.0%计算,三次采油后油藏仍然有丰富的剩余油。孤东八区8-26-J9井聚合物后取心资料也表明,主力油层驱油效率可达到60%,而非主力油层驱油效率只有40%左右。需要扩大波及体积能力更强、洗油能力更强的新驱油体系。

三元复合驱是既可扩大波及体积,又可提高驱油效率的提高采收率的方法。室内试验和矿场实施的结果都表明,其降水增油的效果要好于聚合物驱,而且矿场实施也积累了一定的经验。如孤岛西区三元复合驱与聚合物驱相比,降水增油的效果更加明显,三元复合驱后原油产量最高增加2.33倍,而聚合物驱只增加0.72倍,三元复合驱已提高采收率12.12%,而聚合物驱只提高4.29%,最终预测三元复合驱可提高采收率14%,而聚合物驱为7%。但由于三元复合驱成本高,其经济效益明显低于聚合物驱,孤岛西区聚合物驱的吨聚合物增油可达到65.6t,内部收益率21.3%,而三元复合驱当量吨聚合物增油只有59.1t,内部收益率仅17.3%。同时,在矿场实施过程中,三元复合驱的乳化和结垢的问题,也是影响其矿场大规模推广的两大难题。

因此要解决胜利油田三次采油中存在的问题,必须加强基础研究,深化理论认识,强化先导试验,不断开拓思路,发展新技术、新方向。

二、基础研究进展

随着三次采油规模的不断扩大,剩余资源条件越来越差,具体表现在温度、矿化度更高,油藏非均质更严重、原油粘度高,因此必须寻求改善波及能力更强、洗油能力更好的驱油体系。就胜利油田化学驱而言,由于非均质严重,原油粘度高,因此聚合物必不可少。但大量的研究和现场实践证明,单一聚合物耐温抗盐能力差、调整非均质能力有限且无提高洗油效率能力,因此单一聚合物提高采收率幅度和应用范围有限。通过在聚合物中加入合适助剂的复合式驱油方法,能够产生超加合作用,增强体系的耐温抗盐能力,提高扩大波及体积能力,增加洗油效率能力,复合驱油体系(P+N)有显著的优势,这就形成了聚合物加合增效理论认识。

通过理论计算、分子模拟、室内实验等研究手段,研究了化学剂与原油、化学剂之间,化学剂与岩石之间的相互作用及化学剂在多孔介质中的渗流机制。下面仅就化学剂与原油、化学剂之间相互作用机制研究作简单介绍。

(一)化学剂与原油的相互作用

胜利油区原油中的主要活性组分是饱和烃和芳香烃。用正辛烷(含8个碳, C_8)代表其中的饱和烃组分,甲苯代表其中的芳香烃组分,研究了表面活性剂疏水尾链的结构对降低不同油相代表物/水间界面张力的能力。其中,SDBS(十二烷基苯磺酸钠)为尾链中含有苯环的磺酸盐,为石油磺酸盐的代表物;OAS是尾链由饱和烃组成的羧酸盐表面活性剂,为复合驱中使用的羧酸盐表面活性剂的代表物。由试验结果可以看出,对于油相中的饱和烃,疏水链中含有苯环的SDBS降低芳香烃/水界面张力的能力强;疏水链中含有饱和烷烃活性剂降低饱和烷烃/水界面张力的能力强。这说明表面活性剂的疏水尾链与油相的结构相似,降低其油/水界面张力的能力强,即有相似相溶性。

在表面活性剂的疏水尾链结构相似的情况下,利用分子模拟技术进一步研究了尾链结构与油相结构相近的构效关系。

设定油相分别为正辛烷、十二烷、十六烷,选择表面活性剂的疏水尾链为饱和烃,模拟计算

了当疏水链的含碳数分别为8、12、16时,在不同油/水界面上,表面活性剂吸附和富集的情况。结果表明:当表面活性剂的疏水链与油相一致时,在油/水界面上吸附、富集的密度最大;而表面活性剂降低界面张力的能力取决于其在油/水界面的吸附、富集程度,此时降低界面张力的能力最强。

图7分别为疏水链十六烷的表面活性剂正辛烷、十六烷的油/水界面上富集的分子模拟直观图像。

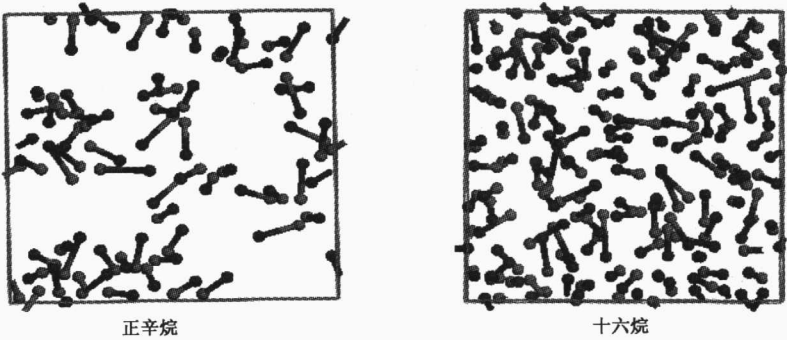


图7 表面活性剂在油水界面上的吸附

从图中可以看出,在油相为十六烷的油/水界面上,疏水链为十六烷的表面活性剂的界面富集程度明显大于在正辛烷中的情况。

上述研究结果进一步说明:表面活性分子结构与油相分子结构相似、相近,使其降低油/水界面张力的效果更好。对胜利油区化学驱主力油田油相构成的剖析发现,胜利油区油相的主要活性组分为饱和烃和芳香烃。从其组成来看,对于不同类型的油相活性组分,需要不同类型表面活性剂分别作用来降低油/水界面张力。而由于原油族组分复杂多样,如饱和烃的组成为 $C_{12}-C_{12}$ 。由胜利原油的组成,一种表面活性剂难以满足其达到最低界面张力的所有条件,复合驱表面活性剂的选择需要走复配路线。同时,胜利石油磺酸盐以胜利化学驱主力油田原油合成,具有最适合胜利原油组成的特性,因而要走胜利石油磺酸盐的复配路线。

采用复配增效思路设计的二元复合驱配方与目的层的最低界面张力可达 $2.95 \times 10^{-3} \text{ mN/m}$ (图8),二元复合驱先导试验取得大幅度的降水增油效果,进一步证明了该思路的正确性和有效性,为胜利油田解决聚合物驱后油藏提高采收率提供了一种方法和手段。

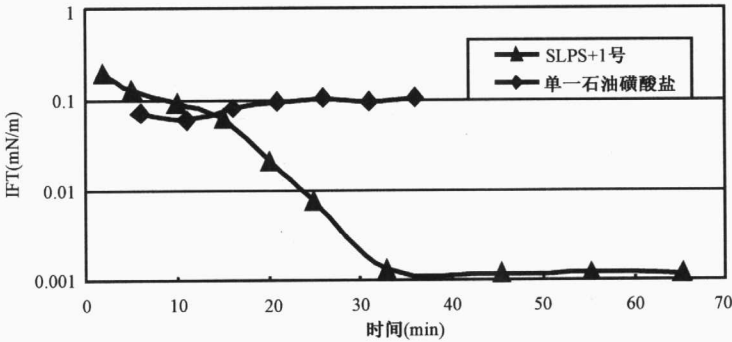


图8 石油磺酸盐、1号助剂与目的层的界面张力图