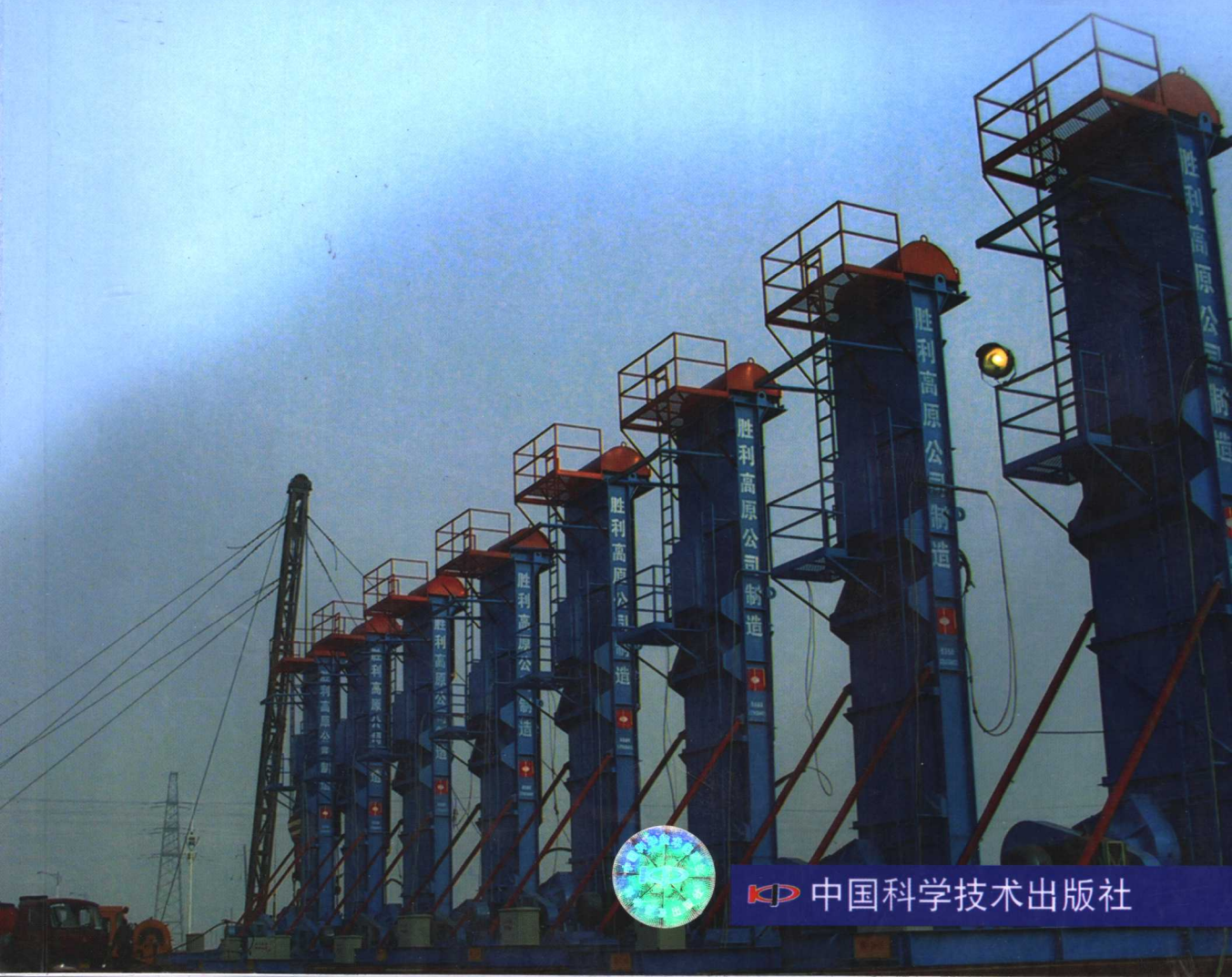


二元复合 驱油技术

孙焕泉 李振泉 曹绪龙 姜颜波 编著



 中国科学技术出版社

二元复合驱油技术

孙焕泉 李振泉 曹绪龙 姜颜波 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

二元复合驱油技术 / 孙焕泉等编著. —北京: 中国科学技术出版社, 2007.5
ISBN 978-7-5046-4654-5

I.二 ... II.孙 ... III.化学驱油 IV.TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 054392 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志, 未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 010-62103210 传真: 010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 28.25 字数: 670 千字

2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1-1000 册 定价: 80.00 元

ISBN 978-7-5046-4654-5/TE·20

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、
脱页者, 本社发行部负责调换)

前 言

在石油开采技术不断发展的今天,化学驱三次采油技术的发展日新月异,在油田的生产中发挥着越来越重要的作用。近年来,随着三次采油规模的不断扩大,化学驱优质资源越来越少,聚合物驱转后续水驱单元不断增多,对油田三次采油持续稳定发展极为不利。针对制约三次采油技术发展的瓶颈,为有效利用现有资源和聚合物驱后进一步提高采收率,开展了以石油磺酸盐为主剂的二元复合驱油技术攻关研究,取得了突破性的成果。从二元复合驱油方法的提出到目前,先后开展了机理研究、基础理论研究、驱油体系设计、数值模拟研究和方案研究,特别是矿场先导试验取得了显著的降水增油效果,并初步形成了二元复合驱油配套技术,成为油田化学驱提高采收率的主要接替技术之一。

本书以阐述二元复合驱油实用技术为核心,以二元复合驱油机理及复合驱油体系性能与评价、数值模拟与油藏工程研究等为重点,讨论了二元复合驱基础理论研究、配方设计和评价及矿场方案优化设计,另外还介绍了二元复合驱油技术的应用。

全书共分为九章,第一章二元复合驱油机理,第二章二元复合驱用剂,第三章二元复合驱体系理论研究,第四章聚合物与活性剂相互作用研究,第五章二元复合驱油体系与油藏岩石的相互作用研究,第六章二元复合驱油配方设计,第七章复合驱油数值模拟研究,第八章二元复合驱油方案设计,第九章二元复合驱油矿场应用实例。本书内容涉及二元复合驱油机理、基础理论研究、配方设计、数值模拟与油藏工程研究等诸多方面,在编写过程中力求做到系统性、科学性、先进性和实用性的统一,是一本专业性强、涉及学科多并具有胜利油田特色的科技书籍。

全书由孙焕泉、李振泉、曹绪龙、姜颜波统筹统稿和审定;王红艳、单联涛、张爱美参加了编写工作;山东大学化学化工学院李英教授提供了部分基础研究成果。本书是参与二元复合驱油技术研究的广大科技工作者的集体智慧的结晶,在此向他们表示衷心的感谢!同时也向在本书编写过程中提供支持帮助与帮助的同志表示谢意。

由于时间仓促,书中难免存在疏漏和不当之处,敬请广大读者提出批评指正。

作者
2006年9月

目 录

绪 论	(1)
第一章 二元复合驱油机理	(6)
第一节 基本概念及机理	(6)
第二节 驱油体系在油藏条件下所需最低界面张力值的确定方法	(14)
第二章 二元复合驱用剂	(18)
第一节 表面活性剂驱油技术的研究进展	(18)
第二节 二元复合驱用表面活性剂	(24)
第三节 二元复合驱用聚合物	(96)
第三章 二元复合驱体系理论研究	(116)
第一节 表面活性剂界面性质研究	(116)
第二节 二元复合驱构效关系研究	(139)
第三节 分子模拟技术研究表面活性剂相互作用	(159)
第四章 聚合物与活性剂相互作用研究	(224)
第一节 表面活性剂—聚合物体系	(224)
第二节 体相中聚丙烯酰胺与表面活性剂相互作用	(238)
第五章 二元复合驱油体系与油藏岩石的相互作用研究	(257)
第一节 表面活性剂在固体表面吸附机理研究	(257)
第二节 二元驱体系中化学剂在固液界面吸附规律研究	(279)
第六章 二元复合驱油配方设计	(303)
第一节 二元复合驱配方设计及性能评价	(303)
第二节 二元驱配方有效性研究	(317)
第七章 复合驱油数值模拟研究	(325)
第一节 复合驱模型	(325)
第二节 复合驱数值模拟软件的完善与改进	(350)
第三节 SLCHEM 微机版软件移植改造	(356)
第八章 二元复合驱油方案设计	(374)
第一节 二元复合驱油藏的初筛选	(374)
第二节 方案设计程序及内容	(376)
第九章 二元复合驱油矿场应用实例	(393)
第一节 试验区筛选	(393)
第二节 先导试验方案	(397)
第三节 矿场实施及效果	(423)
参考文献	(433)

绪 论

一、二元复合驱技术发展的背景

中华人民共和国成立五十多年的石油工业迅猛发展,探明已开发油气资源的平均采收率接近世界先进水平。但由于人均占有油气资源量相对较低,我国仍是一个油气资源匮乏的国家,自1993年成为石油净进口国后,2004年我国原油消耗对外依存度已接近40%。为保持国内油气资源自给量的较高份额,不断提高已开发资源的采收率,石油开发科技人员不断为之努力,而其发展方向就是三次采油技术。“九五”以来,以大庆、胜利两大油田聚合物驱为代表的三次采油技术得到工业化应用。到“十五”末,年产原油1500万吨以上(不含重油),约占国内原油总产量的8.7%。三次采油已成为高含水期油田持续高效开发的一项主导技术。

但是,随着聚合物驱规模的不断扩大,化学驱发展面临的新的矛盾和挑战,主要表现在以下两个方面:一是聚合物驱优质资源是有限的。如胜利油田到“十五”末,I、II类剩余可动储量只有3000万吨,资源接替不足。而根据聚合物驱的动态变化特点,在见效高峰期以后年产量递减达25%~30%,弥补这部分产量需提前两年投入相当规模的储量。而胜利油田聚合物驱油藏条件、井网井况适用性较好的I、II类优质资源动用率已超过90%,对三次采油的持续稳定发展极为不利。二是缺乏聚合物驱后进一步提高采收率的接替技术。已实施聚合物驱的单元,采收率一般达到40%~50%,仍有一半左右的剩余油滞留地下,具有进一步提高采收率的物质基础,但聚合物驱后进一步提高采收率的接替技术亟待攻关突破。

复合驱是指由两种或两种以上驱油剂组合起来的一种驱动方式,它的主要机理就是提高洗油效率和增大波及体积,是在综合了单一化学驱优点的基础上建立起来的一种新型的化学驱油体系。复合驱油技术研究方面,国内外在20世纪80年代中期开始进行大量室内试验研究,并进行了十余个矿场试验,技术上都获得了成功。“八五”期间胜利油田完成了孤东小井距三元复合驱先导性试验,1998年又开辟了孤岛西区常规井距三元复合驱试验区,大庆、新疆油田等均开展了复合驱的攻关。通过攻关,在界面张力、活性图、化学剂损耗、注入方式等方面作了大量的工作,获得了良好的结果。孤东小井距试验作为我国首例复合驱先导试验,取得了突破性进展。在中心井含水率达98.5%,水驱采出程度54.4%,接近水驱残余油状况下实施复合驱,中心井区提高原油采收率13.4%,使总采收率达到67%。但是三元复合驱在矿场应用中也暴露出了一些问题,如注入过程中的结垢影响注入问题、采出液的破乳问题,尽管增油效果明显但经济效益逊色于聚合物驱故限制了推广。

为了克服三元复合驱的弊端,继续探索研究复合驱油技术在胜利油田的应用与发展,开展了无碱体系的二元复合驱油技术研究。研究表明,与单一聚驱相比,同等经济条件下,

二元驱提高采收率增加 5 个百分点；与单一活性水驱相比，二元驱由于加入了聚合物，可防止流体窜流；与三元复合驱，可减少产出液乳化，处理容易，降低处理成本；同时，防止碱结垢，易于现场操作和正常注入。

二、复合驱油技术发展概况

1926 年 Harkins 和 Zollman 首先发现在苯水体系中同时加入油酸钠、NaCl 和 NaOH，苯/水的界面张力可以降低到 0.04mN/m 。1927 年 Uren 和 Fahry 提出：原油开采时水驱原油的采收率与液体界面张力成反比。由于当时生产上尚无迫切要求，也没有好的测定界面张力的方法，因此这些现象无法得到很好的解释，更无法深入研究。到了 20 世纪 40 年代，Vonnegut 发展了测定界面张力的旋滴法，20 世纪 60 年代应用此法成功地测定出低达 10^{-6}mN/m 数量级的超低界面张。同时，提高原油采收率的迫切要求大大促进了对低界面张力现象的研究。为使注水采油后剩余油启动并被开采出来，必须使用适当的化学剂使原油/水体系的界面张力降到 10^{-3}mN/m 数量级，甚至更低。这些化学剂主要是表面活性剂或能够与原油反应（如碱剂）后生成的表面活性剂的物质。这些逐渐导致产生低界面张力化学驱技术，并先后发展成两种驱油方法：一种是大孔隙体积低浓度表面活性剂驱；另一种是小孔隙体系高浓度表面活性剂驱（胶束驱）。两种方法技术上都是成功的，但因经济成本过高而难于推广应用。

碱水驱是化学驱提高采收率方法中研究最早的方法之一。1917 年美国的 Squire 提出了“向注入水中加入碱可以提高原油采收率”的观点，十年后 Atkinson 在美国申请了碱水驱的第一项专利。人们对碱水驱进行深入研究是因为碱剂要比表面活性剂便宜得多。然而，由于碱耗、黏性指进、结垢等原因，矿场试验几乎没有成功的先例。

表面活性剂驱的研究始于 20 世纪 20 年代，在 1984~1998 年间，是表面活性剂驱油技术研究最活跃的时期，特别是在美国每年都有大量文献报道。这期间，表面活性剂驱油理论基础是相态理论、以形成中相微乳液为最大目标，表面活性剂浓度较高，大多在 4% 以上。

聚合物驱的研究始于 20 世纪 50 年代末和 60 年代初期。美国于 1964 年进行了矿场试验，1964 年到 1969 年间的 16 个重要的聚合物驱矿场试验项目中有 10 个的结果是鼓舞人心的或者是成功的，采收率增值最高的达到 8.6%。从 70 年代到 1985 年，美国共进行聚合物驱矿场试验 183 次，试验区原油黏度变化范围 $0.3\sim 160\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。除此以外，聚合物驱在前苏联的奥尔良油田和阿尔兰油田，加拿大的 Horsefly Lake 油田和 Rapdan 油田，法国的 Chatearenard 油田和 Courtenay 试验区及德国、阿曼等都进行了工业性试验。

20 世纪 60 年代初，人们研究了在碱水中加入聚合物以降低驱油剂的流度，提高波及系数，被称为聚合物增效碱驱(AP 驱)，开始了复合驱的发展。Tiorco 公司曾在 Isenhour 油田进行过先导试验，石油采收率增加值达到 26.4%(OOIP)。为了保证碱驱过程中能始终保持“最佳含盐度”和“最佳碱度”的条件，必须在注入设计时调节含盐量和碱量，但过程的调节是十分困难的。R.C.Nelson、S.M.Saleen 和 D.A.Peru 等人的研究提出，在碱水中加入合成的表面活性剂以补偿在驱油过程中由于“最佳含盐度”和“最佳碱度”破坏而造成的界面张力升高的问题。此后，人们发展了多种组合方式的复合驱油体系。最早由 Dome

等几个石油公司开发的碱/表面活性剂/聚合物复合驱油体系(ASP 驱)一出现就受到普遍的重视,主要是因为化学驱油剂的用量大幅度下降。Terra 能源公司最先在美国怀俄明州的 Kiehl 油田进行了 ASP 驱先导试验,可以使石油采收率提高 15%(OOIP)以上。

美国提高采收率方法中,热力采油贡献最大,气驱其次,化学驱最小。提高采收率的研究最早可以追溯到 20 世纪初期,但发展并不快。1973 年由于阿拉伯石油禁运,政府对提高采收率项目给予了特殊的优惠政策,使提高采收率的研究和应用得到迅速发展。1986 年达到高峰,共有 512 个,其中化学驱项目 206 个,占 40%,项目总数超过了热采,但其总产量只占 2.8%。在化学驱方法中,聚合物驱由于投入少、工艺简单,发展最快。从 1986 年开始,化学驱项目一直呈下降趋势,特别是表面活性剂驱几乎停止。但对室内机理性基础研究仍十分重视。

前苏联提高采收率以化学驱为主,据 1992 年资料,在热采、气驱和化学驱提高采收率方法中,化学驱所占比例最大,占 EOR 总量的 77%。在化学驱中,以聚合物驱和碱驱为主,注表面活性剂的项目近年来明显减少。前苏联提高采收率的一个重要特点是尽量采用化工厂的废液,并开发了许多简单易行的增产增注方法。近年来,由于俄罗斯等前苏联国家经济不景气,提高采收率项目明显减少。

我国提高采收率的研究工作是从 20 世纪 50 年代末、60 年代初开始的。在过去的四十多年中,这项工作经历了从无到有,从室内走入矿场,从简单的探索试验到进入工业性应用阶段。特别是近二十年中,通过引进、消化、吸收了国外先进技术,又通过“七五”、“八五”和“九五”国家科技重点项目的攻关,使我国提高采收率技术得到突飞猛进的发展。尤其是经过对我国注水开发油田提高采收率的潜力分析,对今后我国提高采收率的发展方向更加明确。针对我国大多数油田是陆相沉积、以河流—三角洲沉积体系为主,储油层砂体纵横向分布和物性变化均比海相沉积复杂,油藏非均质性严重,而且原油黏度较高的特点,确定了化学驱油作为我国三次采油主攻技术。经过二十年左右的基础、应用和开发研究,我国三次采油技术获得了突破性的发展。目前,我国化学驱油走在世界的前列,在某些领域已达到国际领先水平。

在攻关过程中,按系统工程组成项目攻关内容,坚持室内实验、理论与油田地质条件相结合;注采工艺、地面工程与油田开采条件相结合,坚持严格遵循科学试验程序不超越,实施步伐必须加快的原则,大大加快了攻关成果转化为生产力的速度,仅用十年左右的时间,已基本掌握聚合物驱油技术。目前,聚合物驱已进入工业推广应用阶段,我国成为世界上使用聚合物驱技术规模最大,大面积增产效果最好的国家。

“八五”期间,我国复合驱油技术有了重大突破。我国油田受地质条件制约,注水开发不论波及系数和驱油效率均较低,复合驱油主要是利用化学剂之间协同效应,既可提高波及系数又可提高驱油效率。不仅比聚合物驱可更大幅度提高采收率,而且相比表面活性剂驱所用昂贵表面活性剂用量大大减少,从而使复合驱具有高效驱油并可工业化应用的前景。但是复合驱油技术远比聚合物驱油复杂得多,难度更高,风险更大。“八五”期间我国在“七五”攻关掌握表面活性剂驱油技术的基础上,按系统工程组织了科技攻关,开展了复合驱油机理、多种化学剂间相容性和协同性、驱油剂和油田地质条件的适应性、复合驱数值模拟软件研制、合理注采关系和动态监测技术、注采工艺及采出液处理等技术的研究。自行设计了五个复合驱油先导性矿场试验方案和实施方案,并于 1993 年首次在胜利油区孤东油

田小井距试验区试验成功。另外,在大庆油田、新疆油田和辽河油田开展的复合驱试验也都取得了成功。

我国化学驱油技术的高速发展,已成为我国陆上老油田继续稳产的重大战略接替技术。当前,不论从规模上,年增产原油量和技术的系统完善配套上,均已走在世界的前列。预计,到2010年,我国化学驱油年增油量将占全国陆上年产油量的15%左右,成为世界上化学驱工业化程度最高的国家,为世界油田开发理论和技术发展作出了重大贡献。

胜利油田具有含油层系多、储集层种类多、油藏类型多的特点。各油藏储层流体特性差异大,油气水关系复杂,储层内非均质严重。自1966年投入开发以来,经过以细分层系,完善强化注采系统为中心的综合整体调整、加强注入,狠抓注采工艺地面集输流程的配套完善、采用新工艺不断提高产液量等调整措施,油田实际储量动用情况大幅度提高,开发程度已较高。同时,由于油稠、非均质严重的制约,在目前井网工艺条件下,2001年底全油区标定采收率只有28.6%,与全国相比,注水的采收率偏低;而近几年来对老油田进行了大量的细分层系,加密井网的调整完善工作,进一步加密井网提高水驱采收率的潜力不大。20世纪70年代初,胜利油田开展了注稠化水的实验室和现场探索试验研究工作。1983年参与合成水溶性高聚物新产品的的评价工作,1986年转入“七五”计划国家重点科技攻关子课题。90年代初室内试验研究已取得较大进展,同时数值模拟研究技术和油藏工程研究技术的发展,适合胜利油区油藏特点的复合驱技术取得突破,为开展矿场试验奠定了基础。

1992年,胜利油田开展了国内首例三元复合驱油矿场先导试验。试验区位于孤东油田七区西北部,面积 0.003km^2 ,地质储量 $7.8\times 10^4\text{t}$,注入井4口,受益井9口,为注采井距50m的四个反五点法井组。试验目的层为馆上 5^{2+3} 层,它是一个高渗透、高饱和、中高黏度、河流相沉积的疏松砂岩亲水油藏。试验区经历了注水全过程。复合驱开始时,中心井区采出程度已达54.4%,综合含水98.5%,已累积注水5.1PV,累积水油比达14.0,含水98%以上开采三年,油藏剩余油饱和度仅为34.2%,油藏已接近水驱残余油状态。

先导试验于1992年8月1日开始,至1993年6月24日注完四个化学剂段塞,主段塞为 $1.5\%\text{Na}_2\text{CO}_3+(0.2\%\text{OP-10}+0.2\%\text{CY-1})+0.1\%3530\text{S}$;其中OP-10和CY-1为两种表面活性剂,3530S为聚丙烯酰胺,采用黄河水配制,以四个段塞注入。注入过程由5个阶段组成。第一阶段注入 $0.05\text{PV}0.1\%3530\text{S}$ 聚合物控制流度;第二阶段是化学剂牺牲段塞, $0.05\text{PV}(1.5\%\text{Na}_2\text{CO}_3+0.2\%\text{OP-10}+0.2\%\text{CY-1})$;第三段塞为0.35PV的主段塞;后续为聚合物段塞, $0.1\text{PV}0.05\%3530\text{S}$;最后转入后续水驱。化学剂总计注入0.55PV。

先导试验取得了显著的降水增油效果。全区综合含水由复合驱前96.3%最低降至74.2%,下降22.1%,日产油由 10t/d 最大上升到 76.6t/d ,最大增幅达 66.6t/d ,累积增油 $2.07\times 10^4\text{t}$;中心评价井含水由98.5%最低降到85.0%,降低13.5%,日产油由 1.0t/d 增至 14.3t/d ,累积增油1739.5t,提高采收率13.4%,提高剩余油采收率30.4%。

1997年,在孤岛西区开展了6个井组的三元复合驱扩大试验。试验区面积 0.61km^2 ,地质储量 $197\times 10^4\text{t}$,注入井6口,受益井13口。投产后含水由试验前的94.7%最低降至82.9%,下降11.8%,日产油由试验前的 82t/d 最大上升至 203t/d ,增幅为 121t/d ,累积增油 $24\times 10^4\text{t}$,已提高采收率12.2%,预计最终可提高采收率15.0%。

尽管室内试验和矿场试验都表明,三元复合驱提高采收率的幅度大于聚合物驱,但是由于注入过程中的结垢影响注入问题、采出液的破乳问题等原因,矿场应用的可操作性差,限制了其大规模工业化推广应用。而造成这一问题的最根本的原因,就是碱的加

入。为此,“十五”期间,以研究影响结垢和乳液破乳的主导因素为基础,胜利油田开展了无碱体系的二元复合驱油技术研究,力求在取得较好降水增油效果的前提下,提高复合驱的矿场实用性。但是,由于复合驱技术的驱油机理更为复杂,驱油体系研究难度更高,油藏研究涉及的面更广,为避免矿场试验以及工业推广应用的风险性,针对提高石油采收率所存在的关键问题,加深了基础理论的研究,开展了矿场先导试验,取得了一批创新性成果和重大进展,使二元复合驱技术日臻完善。这些成果和进展使我国复合驱油强化采油技术的基础研究走在世界前列,对实现我国化学驱油剂的国产化和石油工业的可持续发展及技术战略储备具有重要的推动作用。上述研究中体现了化学、化工、物理、数学、油藏地质、油藏工程等多领域、多专业、多学科的交叉集成,促进了油藏、化学及其工程学等前沿领域的发展。

三、著书的意义

二元复合驱油技术是一项涉及多个基础学科和前沿学科的综合性很强的应用技术。该书阐述了二元复合驱的驱油机理,详细介绍了二元复合驱用聚合物和表面活性剂、二元复合驱油体系理论研究、二元复合驱中聚合物与活性剂间的相互作用研究、二元复合驱油体系与油藏岩石的相互作用研究、驱油配方设计、数值模拟优化以及油藏方案研究的有关知识,并针对实例分析了二元复合驱动态变化特征和增油效果等,对今后二元复合驱油技术的完善和发展具有借鉴意义。同时,该书对从事油田开发的领导、科研技术人员和生产管理人员也具有重要的参考价值。

第一章 二元复合驱油机理

第一节 基本概念及机理

一、二元复合驱的基本概念

化学驱是运用化学或物理—化学的理论和方法进行石油开采的方法；是通过向油藏中注入聚合物、碱、表面活性剂等化学剂的水溶液，提高驱替相的黏度，改善流度比，扩大波及体积或降低界面张力，提高驱油效率，从而达到提高原油产量、采收率和开采效益的目的。

化学驱所用的化学剂包括聚合物、碱和表面活性剂等三大类。根据注入化学剂的不同，化学驱可分为聚合物驱、表面活性剂驱、碱驱以及由它们组合起来的二元、三元复合驱。这里所说的二元复合驱是指聚合物和表面活性剂组合的复合驱。

二、二元复合驱机理

原油采收率是采出地下原油原始储量的百分数，即采出的原油量与原始地质储量的比值，是一个油田的油藏地质、流体性质和相应的开采措施的综合指标，它取决于驱油剂在油藏中的波及体积和驱油效率，可用下式表示：

$$E_R = \frac{N_p}{N} = E_v \times E_D$$

式中 E_R —原油采收率，%；

N_p —采出油量， 10^4 t；

N —原始地质储量， 10^4 t；

E_v —波及系数，即驱油剂在油藏中波及到的孔隙体积与油藏总孔隙体积的比值，%；

E_D —驱油效率，即驱油剂波及范围内，所驱替出的原油体积与总含油体积的比值，%。

目前，采油主要是利用向油层注入水的方法进行驱油。由于油层的非均质及水油的黏度差，使注入水前缘不规则，地层中有些部位没有受到水的波及；另外在水波及的区域，油并没有全部被驱走，使一些油残留在孔隙中。因此，要提高原油的采收率主要从扩大波及系数和提高驱油效率这两个方面着手。

二元复合驱比单一驱油方法有更高的采收率，主要是由于复合驱中的聚合物和表面活性剂之间有协同效应，它们在其中起着各自的作用。聚合物的作用是：①改善了表面活性

剂溶液对油的流度比；②对驱油介质的稠化，可减小表面活性剂的扩散速度，从而减小它们的损耗；③可与钙、镁离子反应，保护了表面活性剂，使它不易形成低表面活性的钙、镁盐；④提高了表面活性剂所形成的水包油乳状液的稳定性，使波及系数和洗油能力有较大提高。表面活性剂的作用是：①可以降低聚合物溶液与油的界面张力，提高洗油能力；②可使油乳化，提高驱油介质的黏度；③若表面活性剂与聚合物形成络合结构，可提高聚合物的增粘能力。

(一) 聚合物扩大波及系数

驱油剂在油藏中波及到的孔隙体积分数(波及效率) E_V 可以分解为纵向波及系数和平面波及系数的乘积：

$$E_V = E_A \times E_l$$

式中 E_A —平面波及系数，即驱油剂波及的面积与注入井和生产井控制的含油面积之比；

E_l —纵向波及系数，即驱油剂在垂向上波及的厚度与油层总厚度之比。

影响波及系数的因素主要有：

1. 油层非均质性

油层的非均质性可以分为垂直剖面上、平面上的非均质。前两种统称为宏观非均质即油层岩石宏观物性参数(孔、渗)的非均质性。

油层渗透率在垂直剖面上的非均质性将导致油层水淹厚度上的不均一。因注入水沿不同渗透率层段推进速度快慢各异，当渗透率级差增大时，常常出现明显的单层突进，高渗透层见水早，造成水淹厚度小，波及效率低。

渗透率在平面上的各向非均质性，会导致平面上水线推进的不均匀，使有的水井过早见水和水淹。

2. 储层中驱替相与被驱替相之间流动的差异

流体在多孔介质中的流动能力可以表示为：

$$\lambda = \frac{K_L}{\mu_L}$$

式中 λ —流体的流度；

K_L —流体的有效渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；

μ_L —流体的黏度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

驱替相和被驱替相间的流度关系用流度比表示。水驱时

$$M = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} = \frac{k_{rw}}{k_{ro}} \cdot \frac{\mu_o}{\mu_w}$$

式中 M —水驱油时的流度比；

λ_o —油的流度；

λ_w —水的流度；

k_{ro} —油的相对渗透率；

k_{rw} —水的相对渗透率；

μ_o —油的黏度；

μ_w —水的黏度。

当水的流动能力小于原油的流动能力时，即 $M < 1$ ，驱替是在有利的情况下进行，则波

及系数高；反之，当 $M > 1$ ，即水的流动能力大于原油的流动能力时，驱替是在不利的环境下进行的，这时，将发生“指进”现象。

在水中加入聚合物后，驱替相的黏度明显增大，从而降低了水油流度比，克服了驱替相的“指进”，使平面推进更加均匀，从而提高了平面波及系数。聚合物驱过程中的流度比可用下式表示：

$$M_{po} = \frac{\lambda_p}{\lambda_t} = \frac{\frac{k_{rp}}{\mu_p}}{\frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w}}$$

式中 M_{po} —聚合物溶液驱油时的流度比；

λ_p —聚合物溶液的流度；

λ_t —油水混合带的流度；

k_{rp} —聚合物溶液的相对渗透率；

μ_o —油的黏度；

μ_w —水的黏度；

μ_p —聚合物溶液的黏度。

同时，在纵向上聚合物溶液仍然首先进入渗透性最好的高渗透层，并沿阻力相对较小的大孔道渗流。但由于一方面聚合物在孔壁上的吸附，使有效可流动半径减小；另一方面聚合物溶液黏度大，具有较大的摩擦阻力，造成渗流阻力增加，迫使注入的聚合物溶液进入中低渗透层和由高渗透层向相邻的中低渗透层波及，从而改善纵向波及系数，增加了吸水厚度，最终提高原油采收率。

(二)表面活性剂提高驱油效率

驱油剂在油层孔隙中驱出的原油体积分数(驱油效率) E_D 可以由下式表示：

$$E_D = \frac{\text{被驱出的油量}}{\text{驱油剂波及到的油层}} = 1 - \frac{\bar{S}_o}{S_{oi}}$$

式中 $\bar{S}_o$ —油层孔隙中目前平均含油饱和度；

S_{oi} —油层孔隙中原始含油饱和度。

驱油效率与原油在岩石孔隙中的分布状态有关。原油在岩石孔隙中通常与束缚水共存，因此，孔隙中存在油—水、油—岩石、水—岩石的复杂界面现象，在水驱过程中便出现毛细管滞留现象，使滞留的原油以油滴、油块、油膜的形式分布于孔喉、孔壁。

表面活性剂改变了相渗特性而使洗油效率增加。表面活性剂改变相对渗透率曲线有以下三种基本机理：降低界面张力，增溶油作用、改变润湿性。其中降低界面张力是低浓度表面活性剂增油的主要机理。

从根本上说，表面活性物质降低界面张力的机理有两种；一种是在油水界面上形成表面活性物质的吸附膜，它作为“桥梁”，改变了原来的油水界面，降低界面张力；另一种是体相中的表面活性剂（通常还有助表面活性剂）形成特殊结构，改变了整体水相的性质，从而降低界面张力。界面上表面活性剂的浓度与界面张力有最为直接的关联。

界面上表面活性剂的浓度与油相和水相的性质以及表面活性剂分子自身的结构密切相关。表面活性剂在所应用的体系中具有好的表面活性，能产生低的界面张力，则表明此

种表面活性剂有趋集于界面的倾向，不易留存于界面两边的体相中。因而，要求表面活性剂的亲水、亲油部分有恰当的（平衡）比例。在任一体相中有过大的溶解性，则不利于产生低界面张力（即不易吸附）。油相性质和水相性质均会影响表面活性剂在两相及界面上的分配，影响界面张力。

1. R 值理论

在微乳液形成机理的研究过程中，国外学者直接从最基本的分子间相互作用考虑问题，提出和发展了 R 值理论。既然任何物质间都存在相互作用，作为双亲物质的表面活性剂分子必然同时与水分子和油分子之间有相互作用。这些相互作用的叠加决定了界面膜的性质。该理论的核心是定义了一个内聚作用能比值，并将其变化与微乳液的结构和性质相关联（图 1-1）。

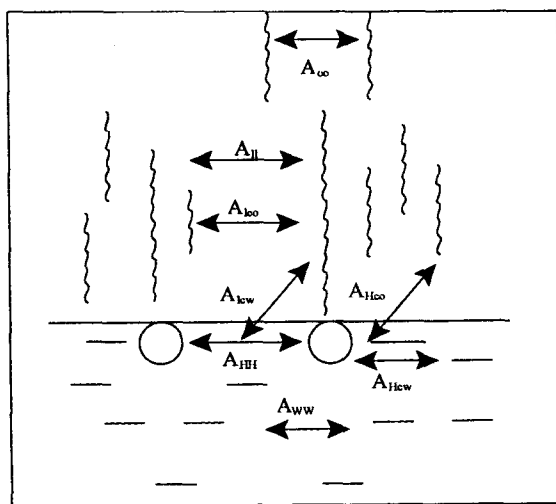


图 1-1 分子间相互作用力示意图

R 值理论首先明确了表面活性剂存在下界面的微观结构。在微乳液体系中存在三个相区，即水区（W）油区（O）和界面区或亲水区（C）。界面区被认为是具有一定厚度的区域，其中表面活性剂是主体，但还包括一些渗透到表面活性剂亲水基层和烷基链层中的水和油分子。真正的分界面是表面活性剂亲水基和亲油基的连接部分，整个界面区域的厚度可以认为类似于油/水界面的厚度。超过这一厚度，压力是各向异性的。

在界面区域存在多种分子间相互作用，R 值理论将之归结为内聚作用能，以表示单位面积上分子与分子之间的内聚能，它们是分子间相互作用势能中的吸引部分，为负值。在界面区表面活性剂的亲油基一侧，存在着油分子与油分子之间的内聚能 A_{oo} 、表面活性剂分子烃链与烃链之间的内聚能 A_{ll} 和表面活性剂分子与油分子之间的内聚能 A_{co} ，而在另一侧则存在水分子与水分子之间的内聚能 A_{ww} 、表面活性剂分子极性基团之间的排斥力 A_{hh} 和表面活性剂分子与水分子之间的内聚能 A_{cw} 。

内聚能 A_{co} 促使表面活性剂与油区的互溶，而 A_{oo} 和 A_{ll} 则阻碍这种溶解。 A_{cw} 促使表面活性剂与水的互溶， A_{ww} 和 A_{hh} 则阻碍这种溶解。如果 A_{co} 和 A_{cw} 中任一种相对于

另一种过于强烈,则不能形成稳定的C层,油、水分成两相,表面活性剂将大部分溶于某种溶剂。

当 A_{CO} 和 A_{CW} 之间的差异不是很大时,则将形成一个稳定的C层,除热运动外, A_{CO} 和 A_{CW} 间的相对大小将决定的C层曲率,从而决定体系中油和水的分散状况。

R值概念开始由Winsor提出,仅仅考虑了表面活性剂分子与油和水的相互作用,定义为 $R=A_{CO}/A_{CW}$ 。事实上,界面区存在着对油、水两相的分离起促进作用的其他作用,Winsor后来将之修正为 $R=(A_{CO}-A_{OO})/(A_{CW}-A_{WW})$ 。但该式仍然忽略了 A_{LL} 和 A_{hh} ,而将促进表面活性剂形成液晶或固态晶体。因此Bourrel等通过深入研究,综合考虑了界面区中所有相互作用,将R值重新定义为:

$$R=(A_{CO}-A_{OO}-A_{LL})/(A_{CW}-A_{WW}-A_{hh})$$

式中 A_{CO} —表面活性剂分子与油分子之间的内聚能,反映了表面活性剂在油相中的混溶能力;

A_{OO} —油分子与油分子之间的内聚能,降低表面活性剂在油相中的混溶能力;

A_{LL} —表面活性剂分子烃链与烃链之间的内聚能,降低表面活性剂在油相中的混溶能力;

A_{CW} —表面活性剂分子与水分子之间的内聚能,反映了表面活性剂在水相中的混溶能力;

A_{WW} —水分子与水分子之间的内聚能,降低表面活性剂在水相中的混溶能力;

A_{hh} —表面活性剂分子极性基团之间的排斥力,提高表面活性剂在水相中的混溶能力。

R值受到表面活性剂分子结构和环境因素的影响。

(1) 亲水相互作用

- a. 无机电解质浓度增大,对离子、POE非离子表面活性剂R值均增大。
- b. 对阴离子表面活性剂,有机反离子取代无机反离子,R值增大。
- c. 对脂肪酸盐类表面活性剂,pH值降低,R值增大。
- d. 对非离子表面活性剂,氧乙烯数减少,R值增大;温度升高,R值增大。
- e. 对亲油链相似而亲水基不同的离子表面活性剂,R值的大小由不同亲水集团在水相中的溶解亲和力和力决定。其降低顺序一般为: $-N(CH_3)_3Cl > -SO_3Na > -SO_4Na > -CO_2Na > -CH_3Cl > -PO_4Na_2$ 。

(2) 亲油相互作用

- a. 油分子烷烃链长增加,一般而言R值减小;只有在极短碳链长度下才会出现相反情况。
- b. 在绝大多数情况下,表面活性剂分子亲油链长度增加,R值增大。
- c. 对亲水基相同、烷烃链长固定的表面活性剂,亲水基从端头向中间移动将导致R值增大。

2. 石油磺酸盐体系低界面张力机理

显示低界面张力的体系通常由水、油、表面活性剂(或表面活性混合物)及盐组成。

油相可以是各种烃类，如烷烃、芳烃、环烷烃等以及它们的复杂混合物，如原油。可以构成低界面张力体系的表面活性剂种类很多，迄今为止研究最多、也最有实际意义的是石油磺酸盐。所用的盐类包括各种水溶性无机盐，研究最多的是氯化钠。体系的低界面张力状态对成分十分敏感，任何一种成分的性质或含量的变化都可能使低界面张力状态消失。

(1) 盐浓度对界面张力的影响

油相中的表面活性剂浓度对水相中盐浓度的增大而增大。在低盐浓度条件下，大部分表面活性剂存在于水相，仅有极少量的表面活性剂进入界面或油相；在高盐浓度下，表面活性剂优先溶解于油相，因而，仅有极少量的表面活性剂进入界面或水相。然而，在某一中等盐浓度时，水相和油相中的表面活性剂浓度近似相等，油水界面的表面活性剂浓度最高，界面张力最低，这一中等盐浓度称为最佳含盐度。

(2) 油链长度对界面张力的影响

原油性质对超低界面张力的产生起到重要作用：产生最低界面张力所要求的盐和表面活性剂浓度根据油的性质和链长度的不同变化很大。随油链长度增加，油相中表面活性剂单个分子的浓度减小。与盐浓度对界面张力的影响趋势相似，在某一特定的油链长度。产生最低界面张力。

Cayias 等人提出了等效烷碳数 (EACN) 的概念：对于一种表面活性剂水溶液，测定它与一系列正构烷烃的界面张力时，发现它与其中一种烷烃界面张力为最低。此正构烷烃碳数称为该表面活性剂的 $n_{\min}$ ，此时的界面张力记为 $\gamma_{\min}$ 。在固定盐浓度和表面活性剂浓度情况下，测定某一油相与 $n_{\min}$ 值不同的系列表面活性剂溶液的界面张力，产生最低界面张力的表面活性剂的 $n_{\min}$ 值称为该油相的 EACN 值。对于相行为或界面张力的研究，可以用烷烃或烷烃混合物代替原油。油相的 EACN 值为油相固有的性质，它不随作为标尺的表面活性剂的变化而变化。

(3) 表面活性剂性质对界面张力的影响

表面活性剂混合物的平均分子量与 $n_{\min}$ 值之间有线性关系，由此可以计算与任何给定原油形成最低界面张力的表面活性剂组成。如果已知每个单独组分的 $n_{\min}$ 值，线性平均规则还能预测任何两种表面活性剂混合物的 $n_{\min}$ 值。对于某些 $n_{\min}$ 值不在液态烃范围内的表面活性剂，其 $n_{\min}$ 值可以利用线性规则外推得到。

表面活性剂结构对形成低界面张力的体系性质有非常大的影响。烷基苯磺酸盐分子中烷基的数目、大小和位置显著影响其 $n_{\min}$ 值和 $\gamma_{\min}$ ，苯环在烷基链上的位置有时也有明显影响。国外有研究者对 60 种以上不同结构的纯烷基苯磺酸盐在不同油链长度产生的最低界面张力进行比较，发现有三大类结构。结构不同，产生最低界面张力的油链长度相同时，其最低界面张力相差以数量级计。当分子量固定时，烷基分支化总是使 $n_{\min}$ 值变小。

表面活性剂浓度对低界面有直接影响。当油相组成、盐浓度、表面活性剂均已选定时，对石油磺酸盐而言，界面张力随表面活性剂浓度增大先降低后升高，通过一个最低值，此时的表面活性剂浓度为最佳。

当表面活性剂—正构烷烃—盐水体系中加入助剂醇时，表面活性剂浓度的影响变得复杂。上述体系可能存在两个低界面张力区域。在低表面活性剂浓度区域 (约 0.1%)，系统形成两相，油和盐水互相平衡；在高表面活性剂浓度区域 (约 4.0%~8.0%)，系统形成三相，中间相微乳液与过量的油和盐水平衡。

(4) 界面电荷对界面张力的影响

界面电荷对界面张力有明显的影响。国外研究者对一些体系的研究结果表明：界面张力的最小值往往对应于电泳滴度的最大值，电泳滴度和界面张力曲线往往互为镜像。

3. 混合表面活性剂的协同效应

在实际中使用的一般都是混合表面活性剂。将表面活性剂混合后改善产品性质的这种作用称为表面活性物质的协同作用，亦称超加和作用；反之则称为负协同作用。表面活性物质的超加和作用可以用表面活性物质分子作用参数—— β 参数进行定量描述。负的 β 值代表两种表面活性剂分子间的吸引作用，正的 β 值代表排斥作用， β 的绝对值越大，相互作用越强； β 值为零时，表示无相互作用。 β 值的范围大致在 +2 ~ -40 以上。

(1) 表面活性物质分子相互作用参数的表达式

水溶液—空气界面混合单分子层上的分子间相互作用参数 β^o 由下式决定：

$$\beta^o = \frac{\ln(\alpha C_{12}^M / X_1 C_1^o)}{(1 - X_1)^2}$$

式中 C_1^o ——在纯表面活性剂 1 的溶液中，给定表面张力所要求的摩尔浓度；

C_{12}^M ——混合表面活性剂的溶液中给定相同表面张力所要求的总摩尔浓度；

α ——表面活性剂 1 占液相中全部表面活性剂的摩尔分数；

X_1 ——界面上表面活性剂 1 占混合单分子层上总表面活性剂的摩尔分数。

溶液中两种混合表面活性剂形成的混合胶束的分子间相互作用参数 β^M 由下式决定：

$$\beta^M = \frac{\ln(\alpha C_{12}^M / X_1^M C_1^M)}{(1 - X_1^M)^2}$$

式中 C_1^M ——纯表面活性剂 1 的临界胶束浓度；

C_{12}^M ——混合表面活性剂的临界胶束浓度；

α ——表面活性剂 1 占液相中全部表面活性剂的摩尔分数；

X_1^M ——界面上表面活性剂 1 占混合胶束中全部表面活性剂的摩尔分数。

(2) 分子的化学结构以及环境因素对分子相互参数的影响

a. 各种类型分子间的相互作用参数。大部分表面活性物质的混合物都显示了吸引作用，这种吸引作用主要来源于静电力。吸引作用强度降低的顺序为阴离子—阳离子 > 阴离子—两性离子 > 离子（阴离子、阳离子）—非离子 > 三甲胺内脂—阳离子 > 三甲胺内脂—非离子 > 非离子—非离子。对于阴离子—阳离子或阴离子—两性离子混合物，超加和作用易于发生；而对称阴离子—阴离子或阴离子—非离子混合物，只有当两种表面活性剂分子具有一定的空间结构时，才显示出超加和作用。

b. 当表面活性剂分子的烷基基团的链长增加时， β^o 和 β^M 均变得更负。当两种表面活性剂的烷基链的长度相等时， β^o 为最大的负值；而 β^M 是在两种表面活性剂烷基链中碳原子总数提高时，才变得更负。

c. 水溶液的 pH 值，可以引起两种表面活性剂分子间吸引强度的降低；当 pH 值不变，降低两性离子的碱性时，也能降低与阴离子的相互吸引作用。提高水溶液中电解质的含量，往往使得负的 β^o 值降低。