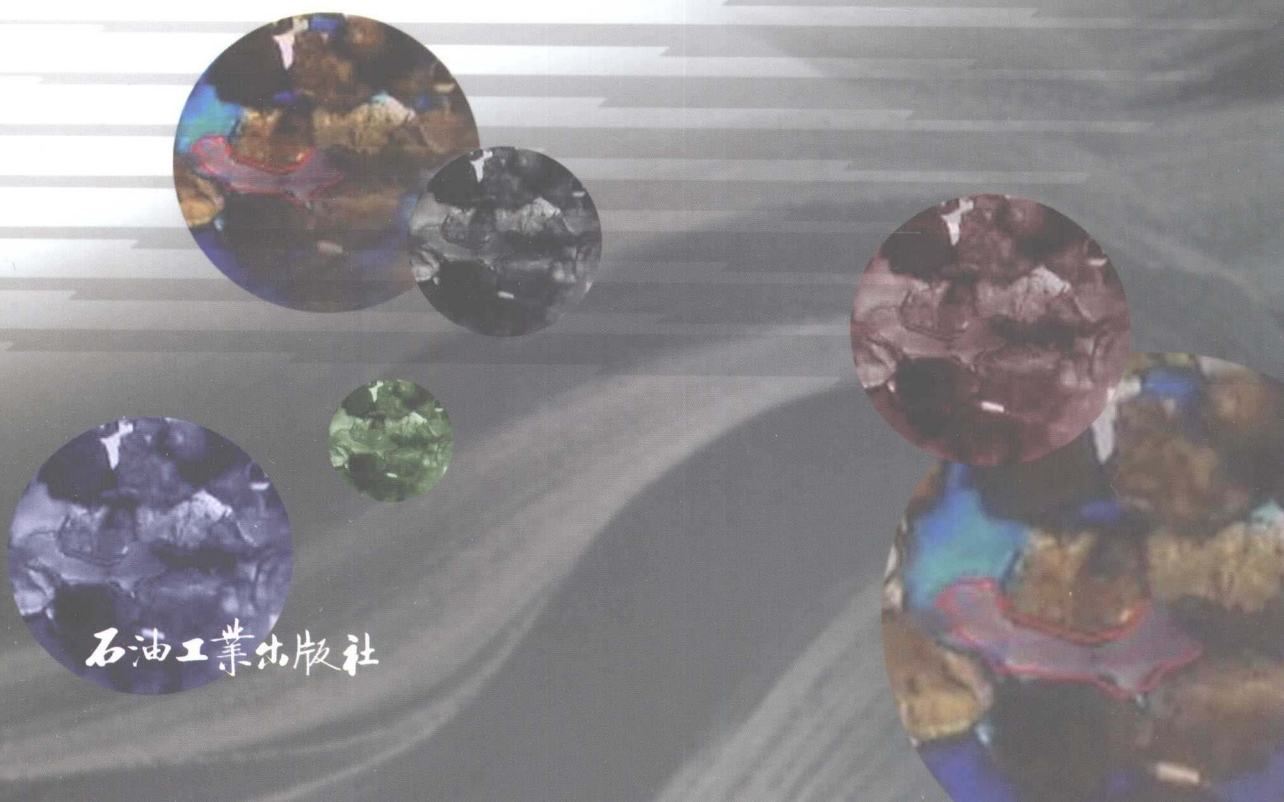




HUAXUEQU WULI HUAXUE SHENLIU
LILUN YU YINGYONG

化学驱物理化学渗流 理论与应用

王 健 编著



石油工业出版社

化学驱物理化学渗流理论与应用

王 健 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

化学驱包括聚合物驱、表面活性剂驱、碱水驱以及复合驱，是中国提高采收率的主导技术。本书全面系统介绍化学驱过程中的物理化学作用和物理化学渗流理论、模型、机理、规律，对于人们更好地认识化学驱过程、加强驱油过程动态监测、及时调整驱油方案、改善化学驱效果等，具有重要的指导意义。

本书适合从事石油开发行业的技术人员、科研人员及院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化学驱物理化学渗流理论与应用/王健编著.

北京:石油工业出版社,2008.7

ISBN 978-7-5021-6545-1

I. 化…

II. 王…

III. 化学驱油-研究

IV. TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 040800 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:石油工业出版社印刷厂

2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:15

字数:378 千字 印数:1—2000 册

定价:45.00 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

化学驱包括聚合物驱、表面活性剂驱、碱水驱以及复合驱，化学驱油是中国提高采收率的主导技术。聚合物驱经过大庆、胜利、大港等油田大规模的矿场应用，可提高采收率10%左右。复合驱先导试验结果表明，该技术可提高采收率20%左右。这充分显示了中国化学驱可大幅度增加可采储量，显著提高采收率。

化学驱过程中存在吸附滞留、化学反应、扩散弥散、相态变化等众多的物理化学作用，因而驱油过程是十分复杂的物理化学渗流过程。对化学驱过程的深入认识有助于人们对化学驱方案进行优化设计，对驱油过程进行动态监测和方案调整，从而达到改善驱油效果的目的。

目前，关于化学驱渗流方面的研究多集中于实验室岩心驱油实验的结果，通常得出不同的驱油剂和不同注入参数组合下的驱油结果，但这些结果往往带有很大的随机性，而没有从深层次上对影响驱油结果的渗流过程与机理进行系统研究，忽略了驱替过程的数学语言描述、过程的模拟、过程的优化、过程的有效性与持久性、驱油过程与结果的相关关系、驱替机理等方面的研究。因此，加强对化学驱物理化学渗流过程与机理进行研究，寻求最佳驱替效果与最优化的驱替过程的关系，并提出对驱油剂的性能要求和注入参数要求，可为化学驱工程方案设计和驱油动态监测做出贡献。

到目前为止，国内外还没有一本全面系统介绍化学驱过程中的物理化学作用和物理化学渗流理论、模型、机理、规律的专著，对物理化学渗流理论应用方面的介绍亦很少。本专著的出版将加强这方面的基础研究，填补这一空白。本专著的出版对于人们更好地认识化学驱过程、加强驱油过程动态监测、及时调整驱油方案、改善化学驱效果等，具有重要的指导意义。

本书适合高等院校的本科生或研究生作为教材或参考书，也适合于油田科研院所的研究人员参考。

本书由李允教授主审。袁迎中博士、罗建新硕士、彭小容硕士等参与了资料的收集和整理工作，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，不当之处恳请批评指正。

笔 者

2008年3月

目 录

第一章 化学驱物理化学作用与物理化学渗流	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 化学驱提高采收率机理	(3)
第三节 物理化学作用与物理化学渗流概述	(9)
第二章 化学驱吸附滞留理论	(11)
第一节 聚合物驱吸附滞留理论	(11)
第二节 表面活性剂驱吸附理论	(16)
第三节 复合体系中化学剂的吸附滞留	(22)
第四节 吸附量实验测定方法	(23)
第三章 化学驱化学反应理论	(31)
第一节 碱水驱化学反应理论	(31)
第二节 表面活性剂驱化学反应理论	(35)
第三节 复合驱化学反应理论及数学模型	(37)
第四章 化学驱扩散弥散理论	(41)
第一节 扩散弥散基本理论	(41)
第二节 考虑黏性指进的扩散弥散理论	(56)
第三节 扩散弥散数学模型与实验测定方法	(62)
第五章 碱水驱物理化学渗流理论	(75)
第一节 碱水驱数学模型	(75)
第二节 驱替过程的有效性标准	(77)
第三节 碱水驱影响因素分析	(78)
第四节 碱水驱实际过程模拟	(85)
第六章 表面活性剂驱物理化学渗流理论	(89)
第一节 表面活性剂驱数学模型	(89)
第二节 物理化学参数的描述	(92)
第三节 表面活性剂驱影响因素及机理分析	(97)
第四节 表面活性剂驱影响因素综合分析	(119)
第七章 聚合物驱物理化学渗流理论	(123)
第一节 非牛顿流体渗流理论	(123)
第二节 水驱前缘推进动态方程	(128)
第三节 增黏水驱前缘推进动态方程	(137)
第四节 聚合物驱吸附方式对渗流的影响	(147)
第五节 聚合物驱数值模拟技术实例	(154)
第八章 复合驱物理化学渗流理论	(174)
第一节 复合驱的特点及主要物理化学作用	(174)

第二节	影响复合驱过程与机理的主要因素	(176)
第三节	复合驱数学模型	(182)
第四节	复合驱数值模拟技术实例	(187)
第五节	化学驱多组分孔隙输运生灭过程理论与模型	(192)
第九章	化学驱动态监测技术	(196)
第一节	化学驱浓度剖面模型实验测定与分析	(196)
第二节	多相渗流的浓度监测模型	(200)
第三节	化学驱动态监测方法	(204)
第十章	井间示踪剂测试技术	(210)
第一节	示踪剂监测原理	(210)
第二节	示踪剂室内筛选评价	(213)
第三节	示踪剂监测模型	(215)
第四节	示踪剂的注入及监测工艺	(223)
第五节	示踪剂产出曲线分析	(224)
参考文献		(228)

第一章 化学驱物理化学作用与物理化学渗流

化学驱油法是在注入水中添加化学驱油剂，如聚合物、表面活性剂、碱或复合体系，以改善注入水的波及效率和洗油能力，从而提高原油采收率的方法。在化学驱油过程中，由于多种化学组分共同存在，它们与地层流体和岩石接触，发生复杂的物理化学作用，其驱油过程是一种复杂的物理化学渗流过程。物理化学渗流涉及复杂流体（非牛顿流体、传质扩散流体、多元多相多组分流体）在孔隙介质中的渗流理论。由于物理化学渗流理论和数学模型非常复杂，其求解方法超出了经典力学方法的范围，所以加强复杂流体中传质扩散流体及非牛顿流体的渗流理论研究，探讨相关理论在油气田开发领域尤其是提高采收率领域的应用，显得尤为重要。

复杂流体在油田开发的实践中经常可以见到。在注化学驱油剂、注气混相驱提高采收率技术的实施过程中，在挥发性油藏和凝析气藏等特殊油气藏的开发过程中，地层流体的流动往往伴随着物理化学现象的发生。经典渗流理论并未考虑上述过程中的传质扩散、吸附、化学反应、相态变化、传热等物理化学变化过程，而这些现象都将对地层油气渗流产生影响。物理化学渗流正是研究多孔介质渗流过程带有物理化学变化的一个力学分支，它的理论研究成果对于油气田开发，对于化学驱提高采收率技术的应用，具有非常重要的实际意义。

第一节 概 述

化学驱包括聚合物驱、表面活性剂驱、碱水驱以及复合驱，是对油田开发过程的剩余油和残余油挖潜的有效方法。

油田开发的历史，就是不断提高采收率的过程。随着对油田开发规律的不断深化认识和油田开发理论的发展，一、二、三次采油反映了油田开发技术的重大发展和不同的开发历史阶段，有力地体现了科学技术的发展推动了生产力的提高。

20世纪40年代以前，油田开发主要是依靠天然能量消耗方式开采，一般采收率仅5%~10%，我们称为一次采油。它反映了油田开发早期的较低技术水平，使90%左右探明石油储量留在地下被废弃。

随着渗流理论的发展，达西定律被用于分析流体在多孔介质渗流，得出油井产量与压力梯度成正比关系，人们从而认识到影响一次采油采收率的主要因素是油层能量的衰竭。从而提出了人工注水或注气，保持油层压力开发油田的二次采油方法。这是至今世界油田的主要开发方式，使油田采收率提高到30%~40%，是一次采油开发技术上的大飞跃。但二次采油仍有60%~70%剩余油留在地下采不出来。为此，多年来国内外石油工作者进行了大量研究工作，逐步意识到制约二次采油采收率提高的因素，从而提出了三次采油方法。

大量理论研究和实践证明，油层是十分复杂的，具有非均质性。油、水（气）两相流体在油层多孔介质中的渗流过程中，不仅注入水（气）不可能活塞式驱油，注入水（气）波及不到全油层，而且油、水（气）两相渗流过程，受油水（气）黏度差、毛细管力、黏

滞力影响,各相流量将随驱油过程各相饱和度变化而变化。只有进一步扩大注入水(气)波及体积和提高驱油效率,才能大幅度提高采收率。从而,在非均质性的油层提出了注入相对分子质量高的聚合物,提高注入水黏度,降低油水黏度差,以提高注入水波及体积的聚合物驱油三次采油方法;采用注入表面活性剂、注碱或注气与原油混相的方法,降低界面张力,提高注入水驱油效率的表面活性剂驱、碱驱、混相驱三次采油方法;以及 20 世纪 80 年代后期发展起来的既可扩大波及体积又可提高驱油效率的复合驱三次采油方法。

三次采油技术有别于二次采油。二次采油是依靠人工补充油层能量的物理作用提高采收率,油水在油层中服从达西定律——建立在流体黏度、组分、相态不改变的条件下,而三次采油方法是建立在注水保持油层压力基础上,又依靠注入大量新的驱油剂,改变流体黏度、组分和相态的物理化学作用,不仅进一步扩大了注入水作用范围,而且使分散的束缚在毛细管中的残余油重新聚集而被采出。因此三次采油要求更精细的掌握分散原油在地下油层中的分布;新的驱油剂与十分复杂的岩石矿物、流体的物理化学作用;探索并掌握非牛顿流体多相渗流油田开发基本规律,从而做到正确合理地进行油田开发部署——井网、井距、层系划分、注采关系、注采工艺、动态监测方法等,以及相应的地面集输系统和净化处理。总之,一整套技术都将随着三次采油技术的应用而发生变化,使油田开发建立在更广泛的多学科综合应用基础上,深化了对油田的认识,从宏观和微观上更强化了地下原油渗流能力,从而,进一步发展了油田开发理论与技术,将油田开发带入一个更高技术水平的新阶段。

中国油田主要分布在陆相沉积盆地,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,泥质含量高,泥砂交错分布,油藏非均质性远高于主要为海相沉积的国外油田;加上陆相盆地生油母质为陆生生物,原油多高含蜡和高黏度。这种陆相沉积和生油条件,加大了我国油田开发的难度。根据我国探明气源不足,油田混相压力较高,不具备广泛气体混相驱条件,因而将化学驱作为我国三次采油主攻技术。

我国曾应用美国能源部提高采收率潜力模型,对我国 13 个油区 174 个油田近千个区块,总计 $74 \times 10^8 \text{t}$ 地质储量进行了三次采油潜力分析,其结果表明:适合聚合物驱 $59.7 \times 10^8 \text{t}$ 地质储量,平均提高采收率 8.7%,可增加可采储量 $5.19 \times 10^8 \text{t}$;适合表面活性剂和复合驱地质储量 $60 \times 10^8 \text{t}$,平均提高采收率 18.8%,可增加可采储量 $11.3 \times 10^8 \text{t}$ 。这些数字显示出三次采油具有巨大的潜力。实际上,经过这些年矿场试验和推广应用,聚合物驱可提高采收率 10%左右,复合驱先导试验可提高 15%~20%。显示出我国三次采油可大幅度增加可采储量,这将为我国高含水老油田稳产创造条件。

我国的聚合物驱首先在大庆油田取得了成功,从 1987 年开始聚合物驱的现场试验,到 1997 年大庆聚合物增产原油产量就占当年原油产量的 1/10,成为稳产的重要手段。

目前在我国大庆、胜利、中原、江汉、南阳等油田都在进行提高原油采收率的室内研究和现场试验推广工作。提高原油采收率方法生产的原油约占原油总产量的 10%。现场主要采用聚合物驱、三元复合驱、气驱等。大庆油田率先进入工业性应用阶段并取得了明显的开发效果,代表了我国 EOR (Enhanced Oil Recovery) 技术水平。

大庆油田从众多的三次采油技术中优选出了聚合物驱技术作为提高油田采收率的一个主攻方向,并提出了一系列聚合物驱技术的新认识、新观点和新思路。

大庆油田根据自身油田的地质特点,主要开展了聚合物驱、三元复合驱、泡沫驱和微生物采油等提高原油采收率配套技术的研究与开发。形成了上述几种提高原油采收率方法的室内模拟、现场运用评价技术系列。聚合物驱油技术进入工业化应用阶段,形成了驱油

机理、油藏适应性评价、注入时机选择、注入方式优选等技术系列。到 2005 年已投产工业化区块 26 块，年产油量达 $1000 \times 10^4 \text{t}$ ，占大庆油田原油产量的四分之一。三元复合驱形成了表面活性剂性能评价、配产优化、数值模拟、矿场试验等配套技术。三元复合驱先导试验结果表明，较之水驱提高采收率 20% 以上，达到了国际领先水平。

总之，三次采油将使中国油田开发进入新阶段。化学驱方法是中国 21 世纪高含水老油田提高采收率的主要方法。化学驱在中国大庆、胜利、大港等油田大规模的工业化矿场应用，聚合物驱可提高采收率 10% 左右，复合驱先导试验可提高采收率 20% 左右。这充分表现了化学驱可大幅度增加可采储量，显著提高采收率，是中国能源安全的重要保障。

第二节 化学驱提高采收率机理

目前化学驱主要通过改善注入水的波及效率和洗油能力，从而提高原油采收率。

一、聚合物驱

聚合物驱油法主要是向水中加入高分子聚合物，提高注入水的黏度，使水驱油流度比下降，减弱黏性指进，从而提高波及系数来提高采收率。该方法又称增黏水驱或稠化水驱。

1. 驱油用聚合物

一般来说，驱油用聚合物包括两大类：一类是人工合成聚合物，如部分水解聚丙烯酰胺（HPAM）；另一类是生物聚合物，如黄原胶等。HPAM 是最常用的一种聚合物，它是由聚丙烯酰胺在氢氧化钠的作用下部分水解而成，从而使其分子链上具有酰胺基和羧基（这一过程称为水解，水解度就是指酰胺基变成羧基的百分数）。这两个基团都是有很强的极性，它们对水有很强的亲和力，所以能溶于水中，对水产生增黏作用。部分水解聚丙烯酰胺聚合物对地层水中的含盐量特别是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子含量、油层温度十分敏感，随着体系中矿化度和油层温度的增加，体系黏度急剧下降。此外，部分水解聚丙烯酰胺还存在化学降解以及剪切降解的问题，这些都是对聚合物驱不利的因素。黄原胶是通过微生物发酵生产得到的，优点是对盐不敏感，适合于矿化度较高的油层，缺点是容易发生微生物降解、热稳定性差以及价格过高，妨碍了大规模推广应用。

驱油用聚合物 HPAM 相对分子质量一般为二千万至三千万，有的高温高矿化度油藏使用的聚合物相对分子质量达三千万以上。当然为了增黏，也不是相对分子质量越大越好，相对分子质量过大，不利于在水中分散、溶解，而且吸附量大，机械降解严重。水解度一般为 20%~25%，水解度过大，所产生的这些极性基团还会更加强烈的吸附在砂岩中的黏土矿物或碳酸盐表面上。特别是水化黏土矿物上的吸附更加强烈，其中以水化蒙皂石负电性最强，因此，吸附也最为严重，在使用聚合物时应注意。通常选用何种相对分子质量多大的聚合物？水解度多大为宜？均需要根据实际油藏岩心进行实验研究确定。

基于聚合物性能和经济因素的考虑，通常对其要求如下：

- (1) 聚合物必须具有一定的抗温抗盐性、老化稳定性，以至油藏温度下聚合物溶液具有稳定的设计黏度；
- (2) 化学稳定性要高，与油层水和注入水的离子不产生化学沉淀，不产生沉淀伤害油层；
- (3) 在岩石孔隙中吸附量小，不堵塞地层；
- (4) 用量小，来源广泛，价格低，增黏效果明显。

典型的聚丙烯酰胺水溶液的黏度与剪切速度之间的关系表现为非牛顿流体特性。从图 1-1 可以看出，黏度随剪切速度的增加而降低。

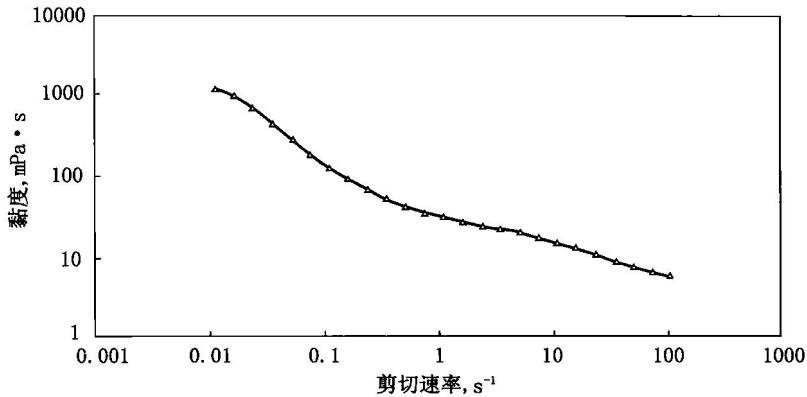


图 1-1 聚丙烯酰胺溶液的流变曲线（聚合物浓度 1500mg/L）

2. 驱油机理

聚合物驱的驱油机理主要是提高水相黏度和降低水相渗透率，降低水相流动性而不明显地影响油相的流动性，使水驱油流度比下降，减弱黏性指进（图 1-2），从而提高波及效率来提高采收率。该项技术经多年研究已基本完善，目前已进入工业化现场应用。

聚合物驱可以减少注水过程中的黏性指进现象。由于水驱油黏性指进严重、易水窜，一旦水窜后注入水沿高渗透大孔道流动，采收率低。及早实施聚合物驱，可以大幅度降低注水量及注水成本，降低油田污水处理工作量和成本。

图 1-3 表示流度比 (M)、注入孔隙体积倍数 (PV) 与面积扫油效率 (E_A) 间的关系曲线。可以发现，油水流度比减小，面积波及系数提高。

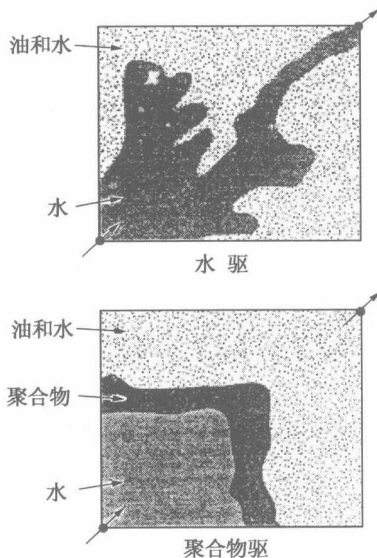


图 1-2 聚合物驱控制黏性指进示意图

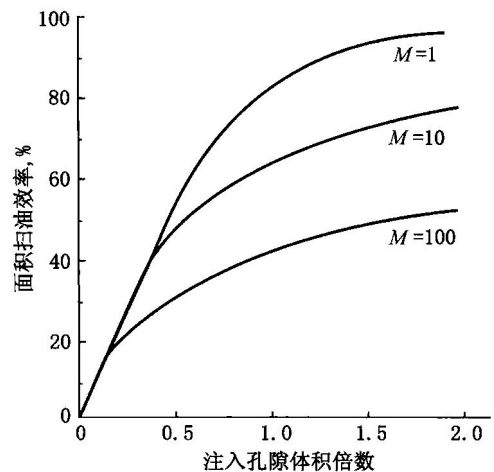


图 1-3 流度比、注入孔隙体积倍数与面积扫油效率间的关系

3. 聚合物驱油矿场应用

聚合物驱是中国提高采收率的主导技术，在大庆、大港、胜利、南阳等油田进入了工业化矿场应用。2002年大庆油田聚合物驱产油量达到 $1000 \times 10^4 \text{ t}$ 。大量的应用实践表明，该方法对于提高原油产量、提高采收率是有效的。矿场试验表明，聚合物驱比单一水驱提高采收率 $5\% \sim 12\% \text{ OOIP}$ （工业化矿场应用表明，大庆油田提高 $8\% \sim 12\% \text{ OOIP}$ ，胜利油田提高 $7\% \sim 8\% \text{ OOIP}$ ）。

由于聚合物提高黏度的幅度有限，因此这种方法仅对原油黏度 $5 \sim 125 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的油藏最适宜；聚合物受油藏温度影响较大，故一般用于低于 93°C 左右的油藏；当储层岩石黏土含量较大时，聚合物的消耗量就会很大；此外，还需要考虑聚合物溶液的注入性，此类聚合物问题尤以生物聚合物严重，堵塞可能是生物残渣或聚合物交联造成的，上述问题在论述实施方案的可能性时，值得考虑。

二、表面活性剂驱

表面活性剂驱油是最复杂的提高采收率方法之一，尽管此法的化学剂费用较高，然而它能大幅度提高微观驱油效率，增油潜力十分巨大。

目前表面活性剂驱分为活性水驱和微乳液驱，活性水驱使用的表面活性剂一般在临界胶束浓度以下，微乳液驱使用的表面活性剂一般在临界胶束浓度以上。

1. 活性水驱

在 20 世纪初，人们就设想用洗涤剂水溶液来提高洗油效率。那么洗涤剂水溶液（活性水）是怎样改善水驱油效果的呢？对此，我们不妨对活性剂溶液从固体表面清除油污作一些分析。图 1-4a：由于水本身的表面张力很高，润湿作用不强，水不能去除掉孔壁油污；图 1-4b：水中加入活性剂后，憎水的非极性端会吸附在油滴及固体表面上，从而减少油污与岩石的附着力；图 1-4c：洗涤剂分子在已经脱掉油的孔壁上和油滴周围形成吸附层，使油滴悬浮在溶液中，然后依靠流水的冲刷而离开岩石颗粒表面，被水驱走。

活性水驱的主要机理是：它能降低油水界面张力，减少残余油的毛细管阻力，从而使残余油更易于起运移，聚集并形成油墙，从而提高采收率。此外，可增加原油在水中的分散，形成 O/W 乳状液，油滴被活性水夹带而被采出；可改变原油的流变性，对于高黏原油非牛顿液体，活性剂进入油中，降低极限动剪切应力；可改变地层表面的润湿性，如亲油变为亲水等。

但是，这一方法存在着它致命的弱点：一是由于巨大的岩石表面会使活性剂被大量吸附在注入井附近，如有黏土质点存在，则活性剂将全被吸附，活性水很快变为清水；另一方面，由于活性水溶液的黏度仍很低，油水流量比几乎无明显变化，波及效率仍不高。

2. 微乳液驱

人们从理论上和室内实验中都已证明，如果驱替液和被驱替液（原油）之间的界面张力达到 10^{-3} mN/m 数量级以下时，则由于毛细管力作用被陷留在较细的或喉道窄口处的二

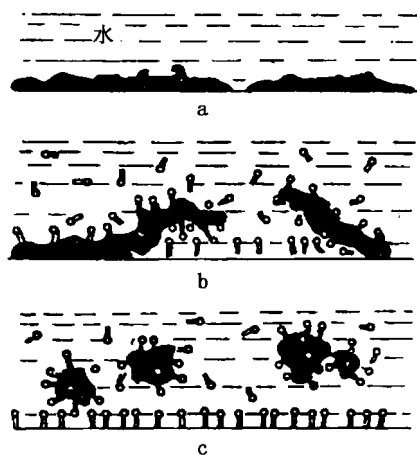


图 1-4 洗涤剂和机械作用从固体表面清除油污的过程

次残余油基本上都可以全部驱出。并且发现，一定配方的活性剂溶液（胶束溶液）可以达到这样的超低界面张力的要求。

所谓微乳液驱油法的就是向地层中注入浓度较高的活性体系，通过增溶作用形成水包油、油包水的微乳液结构，用以提高油层采收率的方法。尽管存在驱油机理了解不够、活性剂成本太高，目前尚处于先导试验（Pilot test）阶段，但仍认为该法是最具发展前途的方法。

1) 束胶的形成

当活性剂在溶液中的浓度较低时（图 1-5），溶液中基本上是单个活性剂分子，而且多数活性分子定向排列在表面上。活性剂在表面上的吸附量随浓度的增加而趋于饱和。

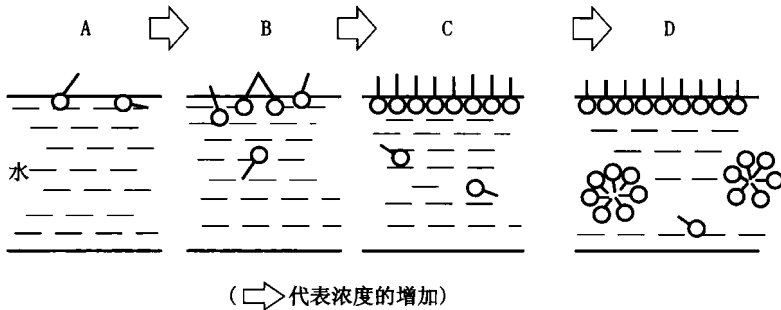


图 1-5 两相界面层吸附物质浓度的变化

当活性剂浓度很高时，因单个活性剂分子在表面已排满，分布在表面的活性剂分子浓度不再增加。而溶液内活性剂分子间相互碰撞的机会增大，活性剂分子的亲油基团的吸引力变得突出，烃链便相互吸引而缔合成以烃链为内核而亲水基外露的分子聚结体，称为胶束（micelle），单个胶束可由 20~100 多个活性分子组成，其直径为活性剂分子的数倍，为 10~100Å，对其整个溶液体系而言，称为胶束溶液。

在形成胶束的过程中，由于链烃和水接触，界面减小了，因而是一个降低界面表面能的过程，即胶束的形成是一个自发过程。

随着活性剂浓度的增减，胶束粒径的大小和数量也会改变。浓度增加时，胶束数量也增加。活性剂在溶液中也开始明显形成胶束的浓度，称为临界胶束浓度。由于胶束的形成，改变了活性剂在溶液中的状态，所以在临界胶束浓度处，溶液的表面张力、溶解度、相对密度、电导率等都会产生突变。

2) 胶束—微乳液的特点——增溶作用

胶束溶液的最大特点就是增溶作用，也就是形成胶束后的溶液，就好像有机溶剂一样，具有增溶不溶于水的有机物质（如原油）的能力，胶束的数目越多，增溶有机物的能力越强。

胶束的增溶作用，是把难溶于水的油相集中分布在胶束内部，由于油不是呈现一分子状态分散，所以它不同于一般的溶液；又由于油滴不是另成一相与水接触，而是居于水外相胶束内部，所以不是一般的乳状液。

以上是烃类在活性剂溶液中的增溶，即是油在水外相胶束中的增溶（图 1-6），同样也存在有水在油外相胶束中的增溶（图 1-7）。



图 1-6 水外相胶束（水包油）



图 1-7 油外相胶束（油包水）

为了增加胶束溶液的稳定性，其中还可以增加助活性剂（Co-surfactant）。助活性剂常用的是 C_3-C_5 的醇类（如丙醇等）。助活性剂本身具有一定的活性，且渗透力强，在胶束直径增大的情况下，不致使油水直接接触而有利于胶束稳定。

加入助活性剂后，体系的增溶能力可大大提高，胶束直径变大，其粒径在 $80\sim 1600\text{\AA}$ 范围内，而成为一种透明或半透明的水—油—活性剂—醇—NaCl 的体系。这类体系称之为微乳液。此时微乳液的界面膜由活性剂和助活性剂构成，这种混合膜是微乳液具有高度稳定性的重要原因，也是加入助活性剂的理由。而胶束的壳层通常只是由活性剂分子所构成，不一定含助活性剂。组成胶束的烃可以用各种石油产品和原油，也可用纯烃。表面活性剂以合成石油磺酸盐更好。

微乳液体系的相特性受溶液的含盐度，即电解质浓度的影响很大。随着体系含盐（如 NaCl）量的增加，可以配制出下相微乳液、中相微乳液及上相微乳液（图 1-8）。电解质的作用是改变溶液中离子势场，调节活性剂亲油、亲水等。

由图 1-8 可知，通过控制水溶液中含盐量的高低，可配制不同类型微乳液。同时也说明了，微乳液对于地层水矿化度的大小是很敏感的。

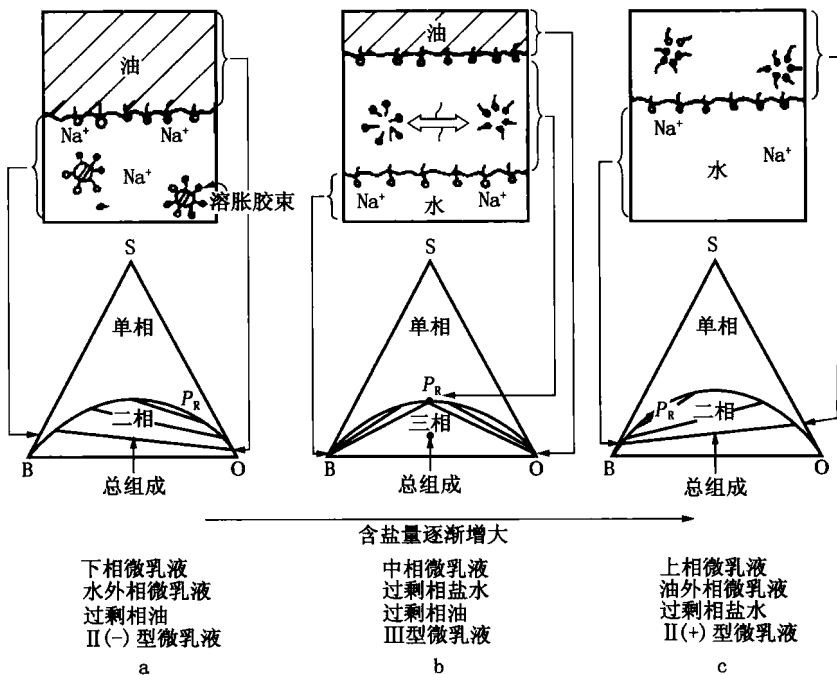


图 1-8 微乳液类型随含盐量的变化关系

B—盐水相；S—活性剂溶剂相；O—油相

3) 微乳液驱油机理

(1) 微乳液与过剩油具有超低界面张力,降低毛细管力。利用微乳液增溶性质,形成水包油结构可通过水相携带原油到地面;形成油包水结构有利于形成富油带(oil bank),增加含油饱和度,大幅度提高采收率;形成单相微乳液能够消除油水界面,即具有消除驱替液和被驱替原油之间的界面,达到与地层油的混相作用,从而提高洗油效率,提高采收率。

(2) 微乳液溶液,严格地说是一种非牛顿流体。这种流体在岩石孔隙中流动时所表现的黏度成为视黏度或达西黏度,其数值大小与流动速度有关。人们利用胶束溶液可望有这样的驱油效果,即在剖面上胶束液先进入高渗透层,由于流速增大,黏度亦增大,迫使这种溶液自行进入低渗透层驱油,可以提高垂向剖面的波及系数。在平面和微孔道中亦可望有类似的特性,从而可以提高波及面积和洗油效率,消除渗透率差异和孔隙结构上的非均质性的不良影响。

胶束—微乳液驱适用的油层条件,还有待于更多的现场实验结果才宜做出评价。目前的看法是:渗透率 $4 \times 10^{-3} \sim 1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 地层深度 200~2000m, 地层温度 16~93℃, 原油相对密度 0.80~0.94, 原油黏度 0.8~25mPa·s, 含油饱和度 30%~60%。

三、碱水驱

将碱液注入油层,利用碱液与有机酸作用,在油层中就地生成活性剂物质,从而降低油水界面张力,改变润湿性,以提高洗油效率,这就是所谓碱性水驱油法。

碱水驱提高采收率方法适用于具有一定酸值的油藏原油,中和 1g 原油所需消耗的 KOH 的毫克数称为酸值,单位是 mg/gKOH。根据国外注碱水驱油的筛选标准,原油酸值应大于 0.2。

利用碱液与原油中的有机酸作用就地生成活性剂物质,克服了活性剂在岩石中被吸附,以及活性剂用量大、价格昂贵的缺点。

该方法具体运作是:向水中加入 1%~5%的 NaOH、 Na_2CO_3 等碱性物,将注入水的 pH 值控制在 12~13 注入油层。由于无机碱来源较广,价格便宜,因此具有明显的经济优势。

碱性水驱的机理是:

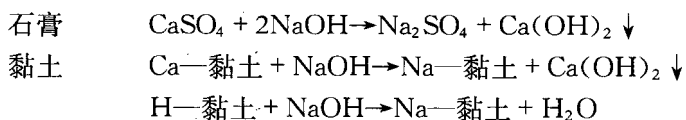
(1) 在低浓度的碱性水驱中,主要的驱油机理是降低油水界面张力。

(2) 高浓度碱性水驱时,碱与原油中的有机酸反应产生的活性剂被吸附在岩石表面,从而改变岩石的润湿性。有人认为,在这种润湿性转化的不稳定过程中,水流作用更容易将油驱走。

(3) 乳化捕集作用:乳化剂的存在会使原油与水乳化而生成水包油型乳化液,将油以雾膜形式随水带出,当遇到狭窄的岩石孔隙时,就会遇阻,乳化被捕集,结果使水的流度降低,抑制水驱黏性指进,提高了垂向与水平波及系数,这种作用又叫乳化液的锁塞效应。这一驱油机理适用于非均质的稠油油藏。

上述机理产生的前提是要求原油中必须含有一带数量的酸。为了能生成足够的活性物质,保证碱与有机酸反应,只有对酸值(酸数)较高的原油方能进行碱性水驱。经研究认为,原油的最小酸数应为 $0.5 \sim 1.5 \text{mgNaOH/g}_{\text{原油}}$ 。酸数不是一个绝对的数值范围,它与酸的类型和产生活性剂性质有关。

当地层岩石中含钙镁等盐类及黏土时,便会与碱反应而产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 一类沉淀。例如:



上述反应的结果，会增加一些碱的消耗，降低碱水驱的效果。因此，进行碱水驱必须尽量避免含石膏、黏土的地层，并且注入碱性水时，要先注入淡水前置液，驱除含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子的地层水。

应当指出，碱水驱尽管存在各种局限性，驱油机理也不十分清楚，但矿场试验表明，它可将采收率提高 10% 以上，仍不失为一种很有效的提高采收率方法。

四、三元复合驱

如前所述，聚合物具有控制流度和提高波及效率的作用；表面活性剂具有降低油水界面张力或/和增溶油水的功能，可以降低驱油过程中的毛细管阻力，提高微观洗油效率；碱能够与地层原油中的酸性物质作用，生成就地表面活性剂，发挥表面活性剂驱的作用。聚合物驱、表面活性剂驱和碱水驱方法各有特点和局限性，如果将它们结合形成三元复合驱，由于具备界面张力低、流度控制合理的双重特点，因而既能大幅度降低残余油饱和度、提高驱油效率，又能提高波及效率，使采收率大大提高。

碱、聚合物、表面活性剂驱油技术主要是注入复合驱油体系，通过改变驱替相的黏度、相对渗透率、油水界面张力、岩石润湿性来提高石油采收率，注入流体既能进行流度控制又能降低界面张力，提高波及效率和驱油效率，从而提高原油采收率。

碱、聚合物、表面活性剂在轻质油油藏中的水驱机理为：

(1) 为采出增产原油有必要加入流度控制剂。不加入适量的流度控制剂，设计最佳的碱/表面活性剂溶液也不会显著增产原油或是增产原油很少。

(2) 在碱、聚合物、表面活性剂溶液中由于吸附作用损失了表面活性剂，或者表面活性剂加入量减少都会大大降低增油产量。

(3) 各种类型的碱、聚合物、表面活性剂都可以混合并使界面张力降至最低值。每一组分都将改变界面张力，因此，如何混合碱、聚合物、表面活性剂溶液中的不同组分是十分关键的。

(4) 注入的化学组分与岩石间的相互作用对采出增产原油起主要作用，超低界面张力值对于采出增产原油是重要的。

(5) 在共注过程中碱的加入减少了表面活性剂和聚合物的吸附作用，表面活性剂和聚合物的吸附作用相互影响并存在流体与流体间相互作用。

中国大庆油田“八五”和“九五”期间所开展的三元复合驱矿场先导性试验结果得到证实，中区西部和杏二区西部三元复合驱矿场先导性试验取得了比水驱提高采收率 17%~22% (OOIP)，比聚合物驱提高采收率 10% (OOIP) 的良好效果，同样展示了该项技术的广阔应用前景。由此可见，以三元复合驱为主的化学复合驱技术已日趋成熟并将在中国油田开发中发挥巨大作用。

第三节 物理化学作用与物理化学渗流概述

一、物理化学作用概述

在化学驱过程中，聚合物、表面活性剂、碱等驱油剂与油藏原油、地层水、油层岩石

接触，发生多种复杂的物理化学作用，它们对驱油过程和结果产生着巨大的影响。国内外学者对此所作的大量研究认为，化学驱物理化学作用主要包括 3 方面。

1. 吸附滞留

在聚合物驱过程中，吸附主要发生在液/固界面上，使驱油剂段塞的有效浓度降低，同时使岩石的水相渗透率降低，从而影响渗流过程和驱油效果。对于表面活性剂驱，由于其分子的两亲性质，表面活性剂分子在液/固界面上发生吸附，使驱油剂段塞的有效浓度降低，并可能使岩石润湿性发生改变；另外，表面活性剂易于自溶液内部迁移到并富集于溶液表面或油/水界面，即易于发生液/液界面（油/水界面）吸附，从而有效地降低油/水界面张力。

2. 化学反应

在化学驱过程中，驱油剂与油层岩石和地层水中的盐类接触，要发生多种化学反应。化学反应的类型和程度取决于化学剂、岩石、流体以及油藏温度等。研究人员对驱油过程中化学反应进行了大量研究，已取得初步认识。碱与地层岩石、原油和地层水中离子发生较强的化学反应；表面活性剂与地层水中的 Ca^{2+} ， Mg^{2+} 等二价阳离子发生沉淀反应；聚合物一般不发生化学反应。因此，在表面活性剂驱和碱水驱工程设计时必须考虑化学反应的影响。

3. 扩散弥散

在化学驱过程中，一定浓度的驱油剂段塞在驱替过程中与地层水或段塞后续注入水接触，是一种互溶驱替过程，发生分子扩散和机械弥散现象，引起驱油过程中化学剂浓度的变化，从而影响驱油过程与效果。

聚合物驱过程中主要存在吸附滞留和扩散弥散作用；碱水驱主要存在化学反应、扩散弥散等；表面活性剂驱过程中主要存在着吸附、化学反应、扩散弥散等。ASP 三元复合驱过程则更为复杂，组成了一个复杂的多组分体系，不仅存在上述物理化学作用，而且发生多组分间十分复杂的协同效应。

二、物理化学渗流概述

由于存在物理化学作用，化学驱过程是一种物理化学渗流过程。物理化学渗流涉及到复杂流体（非牛顿流体、传质扩散流体、多元多相多组分流体）在孔隙介质中的渗流理论。由于物理化学渗流理论和数学模型非常复杂，其求解方法超出了经典力学方法的范围。化学驱物理化学作用的种类和程度将决定其物理化学渗流的过程和结果，其中最为关键的是化学剂浓度发生变化和损失。当浓度低于一定值时，驱替过程将失效，甚至退化为水驱，产生了驱替过程有效性、持久性的问题。

因此，研究化学驱物理化学作用的种类、程度、影响规律、作用机理、数学模型等，建立物理化学渗流理论与数学模型，模拟和分析考虑这些物化作用的驱替过程与结果，努力克服对驱油过程的不利影响，以优化的过程获取最佳驱替效果，对于化学驱数值模拟研究、驱油方案优化设计、驱油动态监测、改善驱油效果、提高开发水平等都具有十分重要的意义。

第二章 化学驱吸附滞留理论

在化学驱过程中，化学驱油剂的吸附损耗是影响驱油效果的关键因素之一。在设计驱油方案时，需要考虑吸附滞留量对驱油过程与效果的影响规律。

物质自一相内富集于界面上的现象称为吸附现象。吸附现象在各种界面上皆可发生。吸附可分为物理吸附和化学吸附。物理吸附是由范德华力引起的，是可逆的，在一定条件下还可以脱附。而化学吸附则是由化学键力引起的，是不可逆的，不能脱附，主要的吸附机理及作用力包括静电力吸附、氢键吸附、色散力吸附、疏水力吸附、化学键力吸附。

在聚合物驱过程中，吸附主要发生在液/固界面上，使驱油剂段塞的有效浓度降低，并且使岩石的水相渗透率降低，从而影响渗流过程和驱油效果。对于表面活性剂驱，通常使用石油磺酸盐，由于其分子的两亲性质，表面活性剂分子在液/固界面上发生吸附，使驱油剂段塞的有效浓度降低，并可能使岩石润湿性发生改变；另外，表面活性剂易于自溶液内部迁移到并富集于溶液表面或油/水界面，即易于发生液/液界面（油/水界面）吸附，从而有效地降低油/水界面张力。

第一节 聚合物驱吸附滞留理论

聚合物（HPAM）在油层中的吸附和滞留量，是聚合物驱工程设计的重要依据。滞留量过大的油层，应用聚合物驱是不经济的，甚至是不能成功的。因此，在设计聚合物驱技术方案时，聚合物吸附与滞留量的测试，是一项必不可少的室内研究工作。

聚合物分子在液/固界面上的吸附很复杂，原因是溶液中聚合物分子的大小是有很大的差异的，而且其分子具有一定的挠曲性的基团，这些基团往往能吸附在固体表面上，而使吸附的分子具有一定形状。固体表面吸附点的数目、聚合物分子的链长、活性基团的数目、位置及聚合物在溶质中的解离度等，都是影响其吸附构型的重要因素。聚合物分子的形状较复杂，摩尔质量分布范围较广，吸附构型往往以混合形式出现。若聚合物与表面活性剂共存时，吸附机理更为复杂。

研究人员对此进行了大量的研究，Willhite 和 Dominguez 等人曾论述过聚合物在多孔介质中的吸附滞留机理。当高分子溶液流经多孔介质时，引起聚合物在多孔介质中滞留的因素包括分子在岩石表面的吸附和孔隙结构造成的力学（机械）捕集。

一、吸附

聚合物吸附是聚合物通过色散力、氢键等作用在岩石孔隙结构表面的浓集现象。所谓静平衡吸附，是将解集的砂岩放入聚合物溶液中浸泡，等温振荡一段时间后，通过测定溶液中聚合物浓度的损失，计算砂岩表面吸附聚合物的量。

1. 吸附模型

对于单一的吸附现象，浓度为 C 的聚合物溶液在岩石表面的吸附速度可写为：

$$\left(\frac{dC_r}{dt}\right)_{\text{吸}} = K_1 \left(1 - \frac{C_r}{C_r^*}\right) C$$