



胜利油田特高含水期提高采收率技术

高温高盐油田化学驱提高采收率技术

驱油剂加合增效 基础研究进展

孙焕泉 李振泉 曹绪龙 宋新旺 王红艳 石 静/编著

Basic Research Progress on the Synergistic
Effect of Chemicals in Enhanced Oil Recovery



科学出版社

胜利油田特高含水期提高采收率技术

高温高盐油田化学驱提高采收率技术

驱油剂加合增效基础研究进展

**Basic Research Progress on the Synergistic
Effect of Chemicals in Enhanced Oil Recovery**

孙焕泉 李振泉 曹绪龙 编 著
宋新旺 王红艳 石 静

科学出版社

北 京

内 容 简 介

针对单一驱油剂难以满足胜利油田高温高盐苛刻油藏化学驱的要求,本书提出了驱油剂加合增效理论,以充分发挥各类驱油剂或驱油体系的技术优势,设计出多元组合式化学驱油体系,获得最佳的加合增效效果和驱油效果。本书论述了化学驱油过程中的物理化学现象,以耐温抗盐驱油剂、驱油体系为基础,阐述了驱油化学剂与原油之间的作用机制、驱油化学剂之间的相互作用机制、驱油化学剂与油藏岩石之间的相互作用机制和驱油化学剂在多孔介质中的渗流机制研究进展,另外还介绍了加合增效在驱油体系设计与矿场实施中的应用。

本书可作为高等院校石油工程专业学生的教材,也可供油田开发、油田化学和提高采收率研究的科学工作者、工程技术人员、管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

驱油剂加合增效基础研究进展=Basic Research Progress on the Synergistic Effect of Chemicals in Enhanced Oil Recovery /孙焕泉等编著—北京:科学出版社,2016.9

ISBN 978-7-03-047359-2

I. ①驱… II. ①孙… III. ①化学驱油-驱油剂-研究 IV. ①TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 029835 号

责任编辑:耿建业 刘翠娜/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张:21 1/2 插页:8

字数:422 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

针对胜利油田高温高盐油藏提高采收率的难题, 现有驱油剂和驱油体系难以适应苛刻的油藏条件, 需要通过理论上的突破解决耐温抗盐驱油剂研制领域的关键问题, 指导新型耐温抗盐驱油剂和驱油体系的设计。“十一五”以来, 胜利油田化学驱科技人员从微观机理入手, 开展驱油剂与原油、驱油剂之间、驱油剂与岩石之间的相互作用及驱油剂在多孔介质中的渗流机制研究, 阐明加合增效的途径与条件, 提出驱油剂加合增效理论, 指导研发了非均相复合驱、强化聚合物驱、乳液表面活性剂驱和低张力泡沫驱等新型驱油体系, 创新形成了多元、多相、组合式驱油方法, 扩大了化学驱的应用范围。

全书共八章, 第一章为驱油剂加合增效导论, 第二章为驱油过程中的物理化学现象, 第三章为化学驱油剂及驱油体系, 第四章为驱油剂与原油的相互作用, 第五章为驱油剂间相互作用, 第六章为驱油剂在油藏岩石上的吸附, 第七章为驱油体系在多孔介质中的渗流, 第八章为加合增效在化学驱油体系设计中的应用。本书内容涉及基础理论研究、配方设计、矿场应用, 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、涉及学科多并具有强烈胜利油田特色的科技书籍。

全书由孙焕泉、李振泉、曹绪龙、宋新旺、王红艳、石静统筹、统稿和审定, 马宝东、单联涛、郭淑凤、王丽娟、刘煜、于群、仇莉、康元勇等参与了部分内容的编写、校对, 在编著过程中得到了胜利油田及勘探开发研究院领导的大力支持, 本书是胜利油田化学驱广大科技工作者集体智慧的结晶, 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, 敬请广大读者批评指正。

作 者

2016年4月

目 录

前言

绪论	1
第一章 驱油剂加合增效导论	2
第一节 化学驱涉及的重要概念	2
第二节 驱油剂加合增效的提出	5
第三节 影响驱油剂加合增效的因素	8
第二章 驱油过程中的物理化学现象	12
第一节 体相溶液	12
第二节 油水界面	19
第三节 固液界面	32
第四节 在多孔介质中的渗流	46
第五节 聚合物模型	60
第六节 表面活性剂模型	65
第七节 碱模型	70
第三章 化学驱油剂及驱油体系	81
第一节 化学驱油剂	81
第二节 驱油体系	110
第四章 驱油剂与原油的相互作用	120
第一节 原油组分	120
第二节 表面活性剂与原油的构效关系	121
第三节 泡沫剂与原油的相互作用	143
第五章 驱油剂间相互作用	145
第一节 表面活性剂间的复配增效	145
第二节 聚合物间的相互作用	197
第三节 表面活性剂与聚合物的相互作用	204

第六章 驱油剂在油藏岩石上的吸附	237
第一节 表面活性剂在固液界面吸附规律	237
第二节 表面活性剂吸附等温线	240
第三节 驱油表面活性剂在固/液界面吸附规律	242
第四节 分子动力学模拟研究表面活性剂在固/液界面的吸附行为	262
第五节 聚合物在固体表面吸附	266
第七章 驱油体系在多孔介质中的渗流	281
第一节 低张力泡沫体系在多孔介质中的渗流规律	281
第二节 非均相复合驱油体系渗流规律	303
第八章 加合增效在化学驱油体系设计中的应用	309
第一节 二元复合驱油体系设计	309
第二节 泡沫复合驱油体系设计	318
第三节 非均相复合驱油体系设计	325
参考文献	332
彩图	

绪 论

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,我们开展了驱油剂加合增效理论研究。

从驱油剂加合增效理论的提出到现在,先后开展了基础理论研究、驱油体系设计、数值模拟研究和方案研究,提出了“油剂相似富集、阴非加合增效、聚表抑制分离”的二元复合驱致效机理,实现了二元复合驱油技术的工业化应用;认识了非均相复合驱油体系“液流转向、变形通过、均衡驱替、调洗协同”的渗流机制和驱油机理,实现了聚驱后油藏非均相复合驱油技术的推广应用。

驱油剂加合增效理论内涵是:以耐温抗盐驱油剂为中心,以驱油剂的设计作为配方设计的基础,以驱油化学剂与原油之间的作用机制、驱油化学剂之间的相互作用机制、驱油化学剂与油藏岩石之间的相互作用机制和驱油化学剂在多孔介质中的渗流机制作为化学驱配方体系的设计原则,开展能够充分发挥各类驱油剂或驱油体系技术优势的多元组合式化学驱油体系设计,获得最佳的加合增效效果和驱油效果。

胜利油田化学驱资源丰富,但油藏温度高、矿化度高、二价离子含量高、非均质性强,实施化学驱难度大。“十一五”以来,以驱油剂加合增效理论为指导,持续创新形成了高温高盐油藏二元复合驱、泡沫复合驱、非均相复合驱等技术系列,截至2015年年底,累积产油5700万t,累积增油2705万t,有力地支撑了胜利油田的稳定发展。

第一章 驱油剂加合增效导论

化学驱是在注入水中添加化学剂,改善流体及储层的物理及化学性质,提高驱油效率和波及性能,从而提高原油采收率的采油方法。胜利油田适合化学驱的地质资源丰富,但油藏温度高、地层水矿化度高、原油黏度高、储层非均质性严重,化学驱条件非常苛刻,给胜利油田实施化学驱带来了挑战,为此,需要发展适应胜利高温高盐油藏的化学驱理论以指导矿场实践。

第一节 化学驱涉及的重要概念

一、原油采收率

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。采收率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。原油采收率定义为

$$E_R = \frac{N_R}{N} \quad (1-1)$$

式中, E_R 为原油采收率; N_R 为采出储量; N 为地质储量。

对于水驱油, 由于

$$N_R = A_V h_V \phi S_{oi} - A_V h_V \phi S_{or} \quad (1-2)$$

$$N = A_0 h_0 \phi S_{oi} \quad (1-3)$$

可得

$$N_R = \frac{A_V h_V \phi S_{oi} - A_V h_V \phi S_{or}}{A_0 h_0 \phi S_{oi}} = \frac{A_V h_V}{A_0 h_0} \frac{S_{oi} - S_{or}}{S_{oi}} = E_V E_D \quad (1-4)$$

式中, A_0 、 h_0 分别为油层的原始面积和厚度; A_V 、 h_V 分别为水波及油层的面积和厚度; ϕ 为油层的孔隙度; S_{oi} 、 S_{or} 分别为原始含油饱和度和剩余油饱和度; E_V 为波及系数 (也称波及效率); E_D 为洗油效率。

从式 (1-4) 可以看出, 对水驱油 (包括其他驱油剂驱油), 采收率与波及系数和洗油效率有如下关系:

$$\text{采收率} = \text{波及系数} \times \text{洗油效率} \quad (1-5)$$

因此提高原油采收率的两条重要途径就是扩大波及系数和提高洗油效率。

二、扩大波及系数

波及系数 (E_V) 是指驱油剂在油藏中波及孔隙体积面积的百分数。 E_V 可以分解为纵向波及系数和横向波及系数的乘积:

$$E_V = E_A E_l \quad (1-6)$$

式中, E_A 为驱油剂波及的面积与注入井和采出井之间控制的含油面积之比; E_l 为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以下几方面。

(一) 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。

(二) 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

$$\lambda = \frac{k_L}{\mu_L} \quad (1-7)$$

式中, λ 为流体的流度; k_L 为流体的有效渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ_L 为流体的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

驱替相和被驱替相间的流度关系用流度比表示。水驱时,

$$M = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} = \frac{k_{rw}}{k_{ro}} \frac{\mu_o}{\mu_w} \quad (1-8)$$

式中, M 为水驱油时的流度比; λ_o 为油的流度; λ_w 为水的流度; k_{ro} 为油的相对渗透率; k_{rw} 为水的相对渗透率; μ_o 为油的黏度; μ_w 为水的黏度。

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, 驱替是在不利的情况下进行的, 这时, 将发生“指进”现象。

为了提高扩大波及系数, 目前重要的方法有两条, 一是使用聚合物提高驱油体系黏度, 改善水油流度比; 二是应用调剖堵水的方法封堵高渗透孔道, 迫使驱

油体系进入含油较高的低渗透地层，这两种方法都可以达到提高驱油体系波及系数的目的。

三、提高洗油效率

洗油效率与毛管数 (N_c) 有着直接关系，增加毛管数，就能提高洗油效率。而降低油水界面张力则是增加毛管数的主要途径。毛管数与界面张力的关系见式 (1-9)：

$$N_c = v\mu_w / \delta_{wo} \quad (1-9)$$

式中， N_c 为毛管数； v 为驱替速度，m/s； μ_w 为驱替液黏度，mPa·s； δ_{wo} 为原油/驱油体系界面张力，mN/m。

N_c 越大，残余油饱和度越小，驱油效率越高。在注水开发后期， N_c 一般在 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ ， N_c 增加将显著提高原油采收率，理想状态下 N_c 增至 10^2 时，原油采收率可达 100%。

由式 (1-9) 可知，提高驱替液黏度、驱替速度及降低原油 / 驱油体系界面张力均可使毛管数升高。但依靠提高驱替液黏度和驱替速度不可能使毛管数实现数量级的升高。可以通过大幅度降低原油/驱油体系界面张力，使油水界面张力降低 4 个数量级，从而使毛管数升高 4 个数量级。水驱时，油水界面张力在 1.0×10^1 mN/m 范围，当把油水界面张力降低至 1.0×10^{-2} mN/m 以下时，即可使毛管数升高 4 个数量级，从而大幅度提高洗油效率。

目前降低驱油体系与原油间界面张力主要有两种办法，一是在驱油体系中加入表面活性剂，降低油水界面张力；二是在驱油体系中加入碱，碱可与原油中的酸性物质生成石油酸皂，也可使油水界面张力降低至 1.0×10^{-2} mN/m 以下。但是由于碱易与地层及地层水中的二价金属离子反应而带来较高的碱耗，同时生成的产物易在水井和油井以及生产系统结垢，这些问题使得碱在驱油中的使用受到很大限制。

油水界面张力通常为 20~30 mN/m，理想的表面活性剂可使界面张力降至 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ mN/m，从而大大降低或消除地层的毛细管作用，减少了剥离原油所需的黏附功，提高了洗油效率。有两种依靠外加表面活性剂的驱油体系可以使原油/驱油体系界面张力降低至 1.0×10^{-2} mN/m 以下。表面活性剂质量分数高于 2% 的称为浓体系；表面活性剂质量分数低于 2% 的称为稀体系，由于稀体系的表面活性剂用量少，经济投入低，日益受到人们的重视。

第二节 驱油剂加合增效的提出

一、化学驱提高采收率

提高采收率（EOR）的定义为除了一次采油和保持地层能量开采石油方法之外的其他任何能增加油井产量，提高油藏最终采收率的采油方法。国内 EOR 方法可通常分为四大类，即化学驱、气体混相驱、热力采油和微生物采油。EOR 方法的细分类见图 1.1。

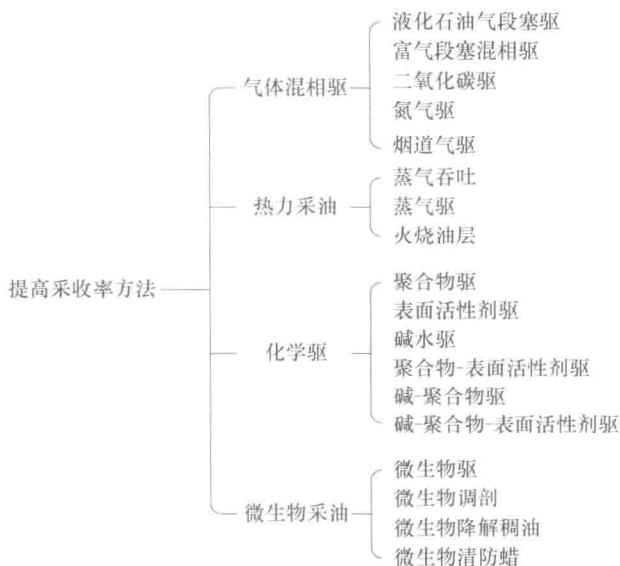


图 1.1 提高采收率分类图

EOR 方法的一个显著特点是注入的流体改变了油藏岩石和（或）流体性质，提高了油藏的最终采收率。其中，向油层中注入化学剂来改变驱替相性质、驱替相与原油的界面性质来提高原油采出程度的方法就是化学驱。通常包括聚合物驱、表面活性剂驱（胶束/聚合物驱、乳状液驱、活性水驱）、碱水驱以及两种化学剂（聚合物、表面活性剂/聚合物二元复合驱）或三种化学剂（表面活性剂/聚合物三元复合驱）的复合驱方法。

（一）聚合物驱

聚合物驱实际上是一种将水溶性聚合物加入水中来增加水相黏度、改善流度

比的方法。美国有时将这种方法称为改善水驱采收率 (IOR)，没有列入提高采收率的方法，而俄罗斯等国家，有时则将这种方法称为流体转向技术。我国及大部分西方国家都将聚合物驱列为三次采油的化学驱方法。其驱油机理主要是提高水相黏度，改善流度比、提高聚合物溶液在油藏中的微观和宏观波及体积，克服和消除驱替相在油层中的指进现象，从而达到提高原油采出程度。目前广泛使用的聚合物有部分水解聚丙烯酰胺、黄原胶，以及近几年研制和开发的缔合聚合物。

部分水解聚丙烯酰胺聚合物对地层水中的含盐量特别是二价的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量及油层温度十分敏感。随着矿化度和油层温度的增加，聚合物溶液的表观黏度急剧下降。此外，部分水解聚丙烯酰胺还存在着化学降解、剪切降解等问题。这些都是对聚合物驱非常不利的因素。

(二) 表面活性剂驱

表面活性剂提高采收率方法还可以再分为胶束驱、乳状液驱及低界面张力的活性水驱。其中，活性水驱由于表面活性剂的用量相对较低而正得到广泛关注。

(三) 碱水驱

碱水驱是 20 世纪 20 年代提出的驱油方法。其主要驱油机理是碱剂与原油中的有机酸反应，生成了具有表面活性的石油酸皂，降低了碱水与原油的界面张力。此外，由于碱水的特殊作用，还可使油层岩石润湿性发生反转、使原油与地层水产生乳化，同时还由于碱水在油层的流动过程中产生乳化夹带作用、聚并、硬膜溶解等作用，因此可以最终提高原油采收率。显然，原油中有机酸的含量、地层水二价阳离子含量，是影响和决定碱水驱成功与否的重要条件和关键因素。

(四) 复合驱

单一的聚合物驱、碱水驱及表面活性剂驱各有优缺点，在配伍的条件下，将它们混合或联合使用，在功能和作用机理上优势互补，达到最佳驱油效果的方法。复合驱包括碱水/聚合物驱二元复合驱、表面活性剂/聚合物二元复合驱和碱水/表面活性剂/聚合物三元复合驱。

(五) 泡沫驱

泡沫驱：泡沫驱是利用泡沫在孔隙介质中的贾敏效应，增加驱替相流动阻力，达到稳定驱替前沿和提高油层波及体积的方法。

(六) 非均相复合驱

由低浓度表面活性剂、聚合物和具有黏弹性且在多孔介质中可运移的黏弹性

颗粒驱油剂 (PPG) 组成的驱油体系, 其中 PPG 在水中不能完全溶解, 在水中为非均一相。

二、驱油剂加合增效的必要性

部分水解聚丙烯酰胺聚合物对地层水中的含盐量特别是二价的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量及油层温度十分敏感。随着矿化度和油层温度的增加, 聚合物溶液的表现黏度急剧下降。此外, 部分水解聚丙烯酰胺还存在着化学降解、剪切降解等问题。这些都是对聚合物驱非常不利的因素。

作为一种优良的驱油剂, 聚合物具有价格低廉、技术成熟稳定、驱油效果明显的优点 (Li and Cao, 2000), 迄今为止, 还没有一种驱油剂能够取代它的位置; 但同时, 由于其自身结构、性能特点决定了其在高温高盐油藏、聚合物驱后油藏和苛刻条件油藏中应用的局限性。

在长期的研究和实践中, 我们发现, 作为一种稳定、优良的驱油剂, 把聚合物与其他一些化学驱油剂复配应用, 可以在保留聚合物优点的同时, 进一步发挥增效作用, 不但能提高、增强聚合物的驱油能力, 还能扩大聚合物的使用范畴, 使之具有耐温抗盐能力和更好的地层条件适应性。如以聚合物和表面活性剂为主的复合驱油体系, 既可提高波及系数, 又可大幅度提高驱油效率, 胜利、大庆的现场实验都证实了复合驱是提高采收率的一种有效的技术手段; 聚合物+交联剂形成的交联聚合物体系, 在提高黏度和波及系数的同时, 还可提高聚合物的耐温抗盐能力, 在大庆、胜利、河南、大港等油田也相继开展了现场实验, 取得了一定的降水增油效果; 利用 N_2 、天然气或其他气体与泡沫剂及聚合物混合形成泡沫的强化泡沫驱改善了普通泡沫稳定性差的缺点: 泡沫黏度随着孔隙介质渗透率的增大而增大, 即渗透率越高泡沫封堵能力越强, 泡沫剂作为优良的活性剂还具有良好的洗油能力, 而且泡沫剂遇水稳定、遇油破灭的特性增加了驱替的选择性, 使泡沫剂在油藏中均匀推进, 从而大幅度降低残余油饱和度, 提高采收率。

随着三次采油规模的不断扩大, 剩余资源条件越来越差, 具体表现在温度和矿化度更高, 油藏非均质更严重, 原油黏度高, 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。大量的矿场实践表明, 就胜利油田化学驱而言, 由于非均质严重, 原油黏度高, 因此聚合物必不可少。但大量的研究和现场实践证明, 聚合物的耐温抗盐能力有局限性, 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化学驱油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, 不但使体系的阻力因子、界面活性大幅度提高, 还可以进一步通过提高驱油效果扩大驱油体系的应用范围。

在长期的研究实践中, 针对三采发展现状存在的问题, 胜利油田已经形成了一些

聚合物加合增效驱油体系：即聚合物+表面活性剂的二元复合驱油体系，聚合物+交联剂的有机交联聚合物驱油体系，聚合物+泡沫剂的强化泡沫驱油体系，这些体系设计的目的就是针对目前比较突出的聚合物驱后、高温高盐及边水、大孔道油藏进一步提高采收率问题，来满足油田增加可采储量，长期稳产和增产的需要。

近年来，国内外研究者们普遍认识到，加强对驱油剂致效机理、驱油剂相互作用机理的研究，不但使驱油体系的研究更具针对性、目的性，减少不同区块条件下研究工作量、重复操作多的问题，还可得到更好的驱油效果。

三、驱油剂加合增效的内涵

针对胜利油田Ⅲ类高温高盐油藏、Ⅳ类大孔道油藏和聚合物驱后油藏提高采收率的难题，现有驱油用化学剂难以适应苛刻的油藏条件，需要通过理论上的突破解决耐温抗盐驱油剂研制领域的关键问题，指导新型耐温抗盐驱油剂和驱油体系的定向设计。胜利三采科技人员从微观机理入手，开展驱油剂与原油、驱油剂之间、驱油剂与岩石之间的相互作用及驱油剂在多孔介质中的渗流机制研究，阐明加合增效的途径与条件，提出了驱油剂加合增效理论，指导研发了非均相复合驱、强化聚合物驱、乳液表面活性剂驱、低张力泡沫驱等新型驱油体系，创新形成了多元多相组合式驱油方法，扩大了化学驱的应用范围。

驱油剂加合增效是以耐温抗盐驱油剂为中心，以驱油剂的设计与合成作为配方设计的两大基础，以驱油化学剂与原油之间的作用机制、驱油化学剂之间的相互作用机制、驱油化学剂与油藏岩石之间的相互作用机制和驱油化学剂在多孔介质中的渗流机制作为化学驱配方体系的设计原则，开展能够充分发挥各类驱油剂或驱油体系技术优势的多元组合式化学驱油体系设计，获得最佳的加合增效效果和驱油效果。

第三节 影响驱油剂加合增效的因素

一、储层非均质性

地层有两种不均质，即宏观不均质性与微观不均质性。前者用渗透率变异系数表示，后者用孔喉大小分布曲线、孔喉比、孔喉配位数、孔喉表面粗糙度等表示。地层越不均质，采收率越低。

二、地层表面的润湿性

润湿是指液体在分子力作用下在固体表面的流散现象。在固体表面上滴一滴

液体，液滴可能沿固体表面散开，如图 1.2 (a) 所示，也可能以液滴形状存在于固体表面，如图 1.2 (b) 所示。前者称为液体润湿固体表面，后者称为液体不润湿固体表面。

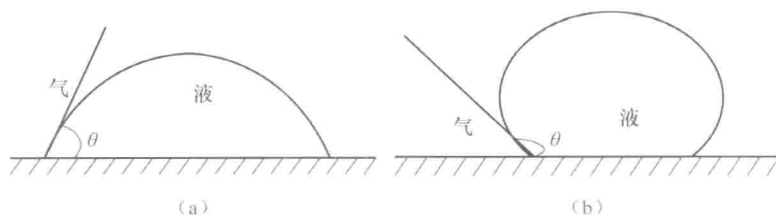


图 1.2 润湿示意图

讨论润湿现象时，总是指三相体系：第一相为固体，第二相为液体，第三相为气体或另一种液体。说明某种液体润湿固体与否，总是相对另一相气体（液体）而言的。如果某一相液体能润湿固相，则另一相就不润湿固相。表示润湿程度的参数为接触角和附着功。

如图所示，通过液-液-固（或气-液-固）三相交点作液-液（或液-气）界面的切线，切线与固-液界面之间的夹角称为接触角，用 θ 表示。油-水-岩石系统的润湿性分为以下几种情况：①当 $\theta < 90^\circ$ 时，水可以润湿岩石，岩石亲水性好，称为水润湿；②当 $\theta = 90^\circ$ 时，油、水润湿岩石的能力相当，岩石既不亲水，也不亲油，称为中性润湿；③当 $\theta > 90^\circ$ 时，油可以润湿岩石，岩石亲油性好，称为油润湿。

某一流体润湿固体表面是各相界面张力相互作用的结果。在三相体中，在三相周界点产生了三种界面张力，当三种界面张力达到平衡时，有杨氏（Young）方程表示其关系：

$$\gamma_{so} = \gamma_{sw} + \gamma_{ow} \cos \theta$$

式中， γ_{so} 为固-油界面张力； γ_{sw} 为固-水界面张力； γ_{ow} 为油-水界面张力。

衡量润湿性大小的另一个指标是附着功或黏附功，是指在非湿相中，将单位面积的湿相从固体界面拉开所做的功。在这一过程中，做功的能量转化为固体表面能的增加。接触角与黏附功具有以下关系：

$$W = \gamma_{sw} (1 + \cos \theta)$$

由上式可见，接触角越小，附着功越大，即湿相流体对固体的润湿程度越好，反之亦然。因此，可以用附着功判断岩石润湿性的好坏。对于油、水、岩石三相体系，当附着功大于油水界面张力时，岩石亲水；当附着功小于油水界面张力时，岩石亲油；当附着功等于油水界面张力时，岩石为中性润湿。尽管油-固或水-固界面的表面张力无法直接测量，但是附着功却能通过测定油-水界面张力和接触角来计算。

三、油层润湿性分类

油层润湿性是指：当存在另一种不混相的流体时，一种流体在固体表面扩展或黏附的趋势。在岩石-原油-盐水系统中，岩石油或对水有一种偏向，根据岩石与地层流体的接触关系，油层润湿性分为油润湿、水润湿和中性润湿三类。润湿相倾向于占据储层岩石的较小孔隙和较大孔隙表面，而非润湿相主要占据较大孔隙的孤岛区。当岩石既不强烈偏向油也不强烈偏向水时，这一系统称为中性润湿系统。

还有另一种润湿性，即分润湿性，也就是说，岩石的不同部位具有不同的润湿偏向性。分润湿性也称不均匀的、斑点状的润湿性，Salathiel 把混合润湿作为分润湿性的一种特殊类型。在具有混合润湿性的岩石中，油湿表面通过较大孔隙形成连续的油湿流道，较小孔隙仍为水湿并不含油。尚需指出，混合润湿性与分润湿性之间的主要区别在于，后一种润湿性既不是指油湿表面的具体位置，也不是指连续的油湿流道。

现在研究结果表明，碳酸盐类油藏大部分为油湿，砂岩类油藏水湿和油湿分布差不多。根据孔隙介质内润湿性是否具有均质性，还可将油藏润湿性分为均匀润湿和非均质润湿两大类。

四、流度比

流度是一种流体通过孔隙介质能力的量度。它的数值等于流体的有效渗透率除以黏度，以 λ 表示。

流度比是指驱油时驱动液流度对被驱液流度的比值，以 M 表示。

若驱动液是水，被驱液是油，则水油流度比可表示为

$$M_{wo} = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} = \frac{k_w / \mu}{k_o / \mu} = \frac{k_{rw} \mu_o}{k_{ro} \mu_w} \quad (1-10)$$

式中， M_{wo} 为水油流度比； λ_w 、 λ_o 分别为水和油的流度； k_w 、 k_o 分别为水和油的有效渗透率； k_{rw} 、 k_{ro} 分别为水和油的相对渗透率； μ_w 、 μ_o 分别为水和油的黏度。

从式 (1-10) 可以看出，要减小水油流度比，有如下途径：①减小 k_{rw} ；②增加 k_{ro} ；③减小 μ_o ；④增加 μ_w 。

五、毛管数

毛管数是一个无因次的准数，由下式定义：

$$N_c = \frac{\mu_d V_d}{\sigma} \quad (1-11)$$

式中， N_c 为毛管数； μ_d 为驱动流体的黏度； V_d 为驱动流体的驱动速度； σ 为油与驱动流体之间的界面张力。

要增大毛管数，有如下途径：①减小 σ ；②增加 μ_d ；③提高 V_d 。

六、布井

不同的布井方式有不同的波及系数，在相同的布井方式中，不同的井距也有不同的波及系数，在布井方式相同时，井距越小，波及系数越大，因此采收率越高。