

弱凝胶调驱 提高采收率技术

陈铁龙 周晓俊 唐伏平 王树义 编著



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

弱凝胶调驱提高采收率技术

陈铁龙 周晓俊 唐伏平 王树义 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

弱凝胶调驱提高采收率技术是通过大剂量注入弱凝胶,利用弱凝胶的流度控制和分流作用,改善注入水的波及效率,提高采收率的方法。本书系统介绍了弱凝胶形成的化学理论、弱凝胶性能与评价方法、弱凝胶微观驱替机理、弱凝胶调驱提高采收率现场实施方法和应用实例分析等内容。

本书可作为石油院校石油工程、油田化学、高分子材料等专业的教学参考书,也可供现场技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

弱凝胶调驱提高采收率技术/陈铁龙等编著.

北京:石油工业出版社,2006.9

ISBN 7-5021-5548-1

I. 弱…

II. 陈…

III. 凝胶-化学驱油-采收率(油气开采),提高-技术

IV. TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 056572 号

弱凝胶调驱提高采收率技术

陈铁龙 周晓俊 唐伏平 王树义 编著

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.cn

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.5

字数:251 千字 印数:1—1000 册

定价:35.00 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

油藏非均质性和不利流度比是影响水驱油藏波及效率和最终采收率的两大重要因素。在油藏的注水开发过程中,由于油藏的非均质性导致注入水沿注入井与生产井之间的高渗透层、大孔道单层突进;同时由于油水粘度比引起水驱油流度比不利,使注入水沿油层出现指进现象;二者均会导致生产井含水上升快,高渗透层水淹严重,而低渗透层未被动用或动用程度低,从而降低注入水的波及效率和油藏最终采收率。

对于水驱油藏出现的上述问题,调剖堵水是解决油藏非均质性较为有效的方法。聚合物驱可以改善水驱油的流度比,解决注入水的指进现象。近年来出现的弱凝胶调驱技术结合了聚合物驱“改善油水粘度比”和调剖的“改善油藏非均质性”的特点,具有广阔的应用前景,因而备受石油界的关注。

聚合物驱作为一种最为成熟的化学驱提高采收率方法,已进入了工业应用阶段。一方面对非均质较严重的油藏,采用聚合物驱时,注入的聚合物溶液会沿注入井与生产井之间的高渗透条带窜入生产井,导致聚合物驱的生产井聚合物早期突破,降低了聚合物的使用效率和聚合物驱油效果。另一方面,由于聚合物驱注入量很大,而且要建立地面注聚合物站,需要大量的投资,从而限制了该技术在油田、小断块中的应用。此外,由于聚合物本身的抗剪切、抗高温、抗盐性能以及与污水配伍性差,很难达到预期效果,限制了聚合物驱的应用。

弱凝胶调驱技术主要是通过对油藏进行大剂量深部处理,降低高渗透层的渗透率,改变后续流体的流向,扩大波及体积,提高原油采收率;同时该技术还可以通过降低油水粘度比,改善水驱油流度比,提高波及效率。弱凝胶(Weak Gel)是通过延缓交联技术,控制聚合物与交联剂的反应时间,使交联剂与聚合物分子发生反应,形成一种以分子间交联为主的弱交联体系。由于交联度较弱,在较高的压差下还可以流动,因此弱凝胶又称为可动凝胶。

本书由概述、弱凝胶化学、弱凝胶性能评价、微观调驱机理、调驱实施方法和实例分析共6章组成。内容涉及弱凝胶室内研究到现场应用诸多环节。第一章从采收率概念出发,介绍了提高采收率的方法和弱凝胶的发展状况;第二章阐述了弱凝胶形成的化学机理以及现场应用的化学配方;第三章介绍了弱凝胶室内研究方法和评价手段;第四章通过微观驱替模型揭示了弱凝胶调驱提高采收率的机理;第五章介绍了弱凝胶的室内研究、数值模拟、动态监测、实施工艺和评价方法等实施方法;第六章分别对高盐、高温、稠油和裂缝性低渗透等油藏实施弱凝胶调驱进行了分析和评价。

在本书的编写过程中,得到了赵金洲教授和彭克宗教授的关怀和鼓励。在资料的收集和整理过程中,赵继宽、徐赋海和张雅玲等付出了辛勤劳动,华北油田采油工艺研究院提供了华北弱凝胶调驱综述资料,在此作者深表诚挚谢意。由于作者水平有限,书中存在的缺点和不足在所难免,恳请专家和读者提出宝贵意见,作者在此表示衷心感谢。

作者

2006年7月18日 于西南石油大学

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 采收率	(1)
一、采收率的概念	(1)
二、提高采收率方法	(2)
三、影响采收率的因素	(3)
第二节 凝胶及其分类	(14)
一、本体凝胶	(14)
二、胶态分散凝胶	(15)
三、弱凝胶	(20)
第二章 弱凝胶化学	(26)
第一节 概述	(26)
一、弱凝胶使用的聚合物	(26)
二、弱凝胶交联剂	(28)
三、交联反应类型	(29)
第二节 金属离子交联体系	(30)
一、柠檬酸铝交联体系	(32)
二、铬交联体系	(33)
三、柠檬酸钛交联体系	(36)
第三节 有机酚醛交联体系	(36)
一、甲醛与 HPAM 的反应过程	(37)
二、甲醛、酚与 HPAM 的反应过程	(37)
三、乌洛托品、间苯二酚与 HPAM 的反应过程	(37)
第四节 弱凝胶化学配方	(38)
一、HPAM—有机铬体系	(39)
二、HPAM—柠檬酸铝体系	(39)
三、HPAM—有机锆体系	(39)
四、黄胞胶—有机铬体系	(40)
五、HPAM—有机酚醛体系	(40)
第三章 弱凝胶性能评价	(41)
第一节 弱凝胶的成胶性能	(41)
一、成胶强度	(41)
二、弱凝胶的稳定性	(42)
三、弱凝胶的流变性	(43)
第二节 在多孔介质中的流动特性	(45)
一、阻力系数与残余阻力系数	(45)

二、弱凝胶耐冲刷性能	(47)
三、弱凝胶在多孔介质中的流动性	(47)
第三节 弱凝胶调驱特性	(48)
一、平面模型驱油	(48)
二、线性模型驱油	(50)
三、改善剖面	(51)
第四节 弱凝胶影响因素	(51)
一、聚合物相对分子质量的影响	(51)
二、聚合物浓度的影响	(51)
三、交联剂浓度的影响	(52)
四、聚合物与交联剂比值的影响	(52)
五、温度的影响	(53)
六、矿化度的影响	(53)
第五节 弱凝胶的抗盐性	(54)
一、盐对弱凝胶的影响	(54)
二、聚合物类型对抗盐弱凝胶的影响	(55)
三、交联剂对抗盐弱凝胶的影响	(56)
第四章 弱凝胶微观调驱机理	(60)
第一节 微观驱替实验	(60)
一、微观填砂模型	(60)
二、实验仪器	(60)
三、实验方法	(61)
第二节 实验现象及分析	(61)
一、水驱油过程	(62)
二、聚合物驱油过程	(62)
三、弱凝胶驱油过程	(65)
四、弱凝胶调驱后水驱过程	(66)
第三节 弱凝胶微观调驱机理	(68)
一、弱凝胶在多孔介质中的流动规律	(69)
二、弱凝胶调驱提高原油采收率微观机理	(70)
第五章 弱凝胶调驱实施方法	(72)
第一节 弱凝胶室内研究	(72)
一、弱凝胶性能评价	(72)
二、弱凝胶调驱油藏筛选与评价	(75)
第二节 弱凝胶调驱数值模拟	(77)
一、地质模型的建立	(77)
二、弱凝胶调驱数模所需参数	(78)
三、弱凝胶调驱注入参数	(79)
四、开发效果预测	(81)
第三节 弱凝胶调驱动态监测	(83)

一、示踪剂监测	(83)
二、弱凝胶注入监测	(85)
三、弱凝胶调驱生产动态监测	(85)
第四节 弱凝胶调驱实施工艺	(88)
一、弱凝胶调驱地面工艺	(88)
二、注入中出现的问题及应急对策	(90)
第五节 弱凝胶调驱效果评价方法	(91)
一、利用递减法计算增油量	(91)
二、利用水驱特征曲线计算增加的可采储量	(92)
三、利用 Hall 曲线计算弱凝胶的阻力系数	(93)
四、利用含水率与采出程度关系曲线预测提高采收率的幅度	(95)
第六章 弱凝胶调驱实例和分析	(96)
第一节 高矿化度油藏	(96)
一、地质开发概况	(96)
二、弱凝胶调驱方案	(100)
三、调驱效果评价	(102)
第二节 高温油藏弱凝胶调驱	(108)
一、地质及开发特征	(108)
二、高 30 断块示踪剂测试及解释	(112)
三、调驱方案设计和实施	(114)
四、效果分析	(116)
第三节 稠油油藏弱凝胶调驱	(118)
一、油藏地质特征及开发特征	(118)
二、一期调驱	(122)
三、二期调驱	(125)
四、三期调驱	(127)
第四节 低渗透裂缝性油藏弱凝胶调驱	(130)
一、油藏地质特征	(130)
二、油藏开发特征	(132)
三、弱凝胶调驱方案	(135)
四、调驱效果	(138)
第五节 华北弱凝胶调驱综述	(140)
一、应用规模	(140)
二、工艺技术	(140)
三、弱凝胶调驱剂的适应性	(142)
四、弱凝胶调驱工艺的适应性	(145)
参考文献	(158)

第一章 概 述

在油藏水驱过程中,油藏的最终采收率主要受油水界面张力、水驱油流度比和油藏非均质性等因素控制。油水界面张力影响着驱油效率,而不利流度比和油藏非均质性是影响波及效率的两大主要因素。改善和提高注水波及效率的主要途径通常是聚合物驱、调剖和堵水。尽管注聚合物溶液技术比较简单,但聚合物驱成本投入大,并且由于地层孔隙剪切和地层高温、高矿化度等因素影响,聚合物注入地层后其有效黏度损失很大,往往达不到预期目的。对于非均质程度较高的地层,聚合物会沿高渗透带窜流。对于常规凝胶调剖堵水,由于体系中化学剂浓度高,成胶速度快且不易控制,从而限制了凝胶的注入量和有效作用距离,通常仅限于井筒周围 5~10m 的近井地带,调堵作用改善的只是井眼附近的吸水剖面 and 产液剖面。随着后续注入水量的增加,油藏的非均质性将导致注入水绕过封堵层又很快地沿高渗透层窜入生产井。

弱凝胶调驱技术是在凝胶的深部调剖基础上,结合聚合物驱的特点而提出的一项新技术。弱凝胶将传统的凝胶堵水调剖与聚合物驱的特点综合于一体,既可以在油藏深部调整和改善地层非均质性,达到油藏流体深部改向的目的,从而扩大波及体积;同时弱凝胶又能够作为驱替相改善水驱油不利的流度比,提高注入水的扫油效率。弱凝胶调驱技术中的“调”主要通过对油藏进行大剂量深部处理。弱凝胶的调剖作用体现在弱凝胶的大分子可以改善油藏平面和纵向上的非均质性,达到调整吸水剖面和油藏渗透率级差,改变后续流体的流向,扩大波及体积。而弱凝胶的驱油机理在于通过增加水相黏度,改善水驱油流度比,提高波及效率,最终达到增加水驱采收率的目的。

关于弱凝胶国内外石油界尚没有一个明确的定义,因此很难确定“弱”到何种程度的凝胶才能称之为弱凝胶。弱凝胶的“弱”是相对于常规不可动凝胶而言的。常规凝胶是一种连续的三维网状结构,由于聚合物浓度高,交联点多,交联强度大,又称为本体凝胶(Bulk Gel)或不可动凝胶。弱凝胶中聚合物浓度相对较低,虽然交联反应多发生于分子间,但交联强度弱,在较高的压差下可以流动,又可称为可流动凝胶。弱凝胶与胶态分散凝胶(Colloidal Dispersion Gel, CDG)也有区别,CDG 形成的是以分子内交联为主、分子间交联为辅的胶态分散体系,而弱凝胶则是以分子间交联为主体的低强度的三维网状结构。弱凝胶(Weak Gel)采用的聚合物浓度一般为 1000~2000mg/L,通过延缓交联技术控制聚合物与交联剂的反应时间,保证凝胶溶液可以大剂量注入并到达地层深部。随着时间的延长,交联剂与聚合物分子发生反应,体系黏度逐渐增加,形成一种以分子间交联为主的弱交联体系。

第一节 采 收 率

一、采收率的概念

油藏的采收率定义为油藏累计采出的油量与油藏地质储量比值的百分数。从理论上来说,采收率取决于驱油效率(E_D)和波及效率(E_V)。采收率的定义式为:

$$\eta = E_D \times E_V \quad (1-1)$$

式中 E_D ——驱油效率,又称微观驱替效率,它是指注入流体波及区域内,采出的油量与波及区内石油储量的比值;

E_V ——波及效率,又称扫油效率或宏观驱替效率,它是指注入流体波及区域的体积与油藏总体积的比值。

对于一个典型的水驱油藏来说,如果油藏的原始含油饱和度(S_{oi})为 0.60,水驱后注入水波及区内的残余油饱和度(S_{or})为 0.30,那么注入水驱油效率为:

$$E_D = \frac{S_{oi} - S_{or}}{S_{oi}} = \frac{0.60 - 0.30}{0.60} = 0.50 \quad (1-2)$$

如果油藏相对比较均质,注水的波及系数(E_V)可以达到 0.7,那么水驱采收率为:

$$\eta = E_D \times E_V = 0.7 \times 0.5 = 0.35 = 35\% \quad (1-3)$$

水驱后油藏采收率为 35%,也就是说,注水采出了油藏原油的 1/3 左右,还有大量的(约为 2/3)原油仍然留在地层中,用注水的方法不能把它们采出地面。

尽管上述计算是对一个理想油藏采收率的计算结果,但它具有一个普遍意义,就是不管是哪一个油藏水驱后,仍然有大量的石油留在地下。根据采收率的计算公式(1-1)可知,影响采收率大小的主要因素是驱油效率和波及效率。因此。所有提高采收率的方法都是致力于提高驱油效率或(和)波及效率。

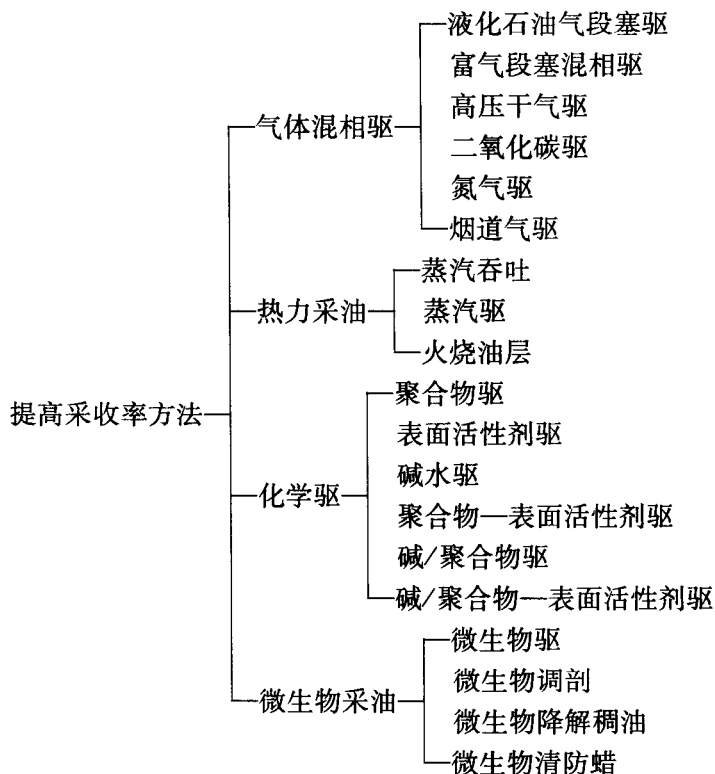
油藏水驱采收率较低的主要原因在于油藏层间和层内的非均质性、驱替流体(水)与被驱替流体之间的流度比较大以及油水之间的界面张力较高等。事实上,一方面,水驱后油藏波及区内存在一定量的残余油,如果采用的方法能够显著地降低油水界面张力,可以降低残余油饱和度,那么就能显著地提高采收率。另一方面,注入水并不能完全波及整个油藏,也就是说,油藏内有一部分体积的原油未被注入水接触,当然那一部分原油只能留在地下岩石的孔隙之中。如果采用流度控制的方法,能够改善注入水的波及系数,就可以显著地提高采收率。

一种最为理想的提高原油采收率(EOR)方法就是把驱油效率和波及效率同时提高。即先注入一种流体段塞使波及区内残余油(S_{or})降为零,然后再注入一种流体段塞扩大第一个段塞的波及体积,使之与整个油藏原油相接触,将波及系数提高到 100%。这样的一种方法就可以使油藏的采收率达到 100%。当然,这种“超级”流体是不存在的,即使它存在,使用也不会很经济。但是,人们总是可以采用比较经济的方法使 S_{or} 降到更低,波及效率提高得更多。

二、提高采收率方法

提高采收率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或提高油藏最终采收率的采油方法。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。按照注入流体的性质,EOR 方法可分为四大类,即化学驱、气体混相驱、热力采油和微生物采油。其中化学驱进一步分为聚合物驱、表面活性剂驱、碱驱和复合驱(聚合物—表面活性剂驱,聚合物—表面活性剂—碱三元复合驱,表面活性剂—气体泡沫驱,聚合物—泡沫驱等);气体混相驱可分为二氧化碳驱、氮气驱、

烃类气体驱(干气驱和富气驱)以及烟道气驱;热力采油方法可分为蒸汽吞吐、蒸汽驱、火烧油层等;微生物采油方法可分为微生物驱、微生物调堵及微生物降解原油等方法。EOR 方法的细分类如下:



三、影响采收率的因素

1. 波及效率

波及效率(E_v)是指注入流体波及的体积与油藏体积的比值,它是面积波及系数(E_{vA})与垂向波及系数(E_{vV})的乘积。即:

$$E_v = E_{vA} \times E_{vV} \quad (1-4)$$

图 1-1 为理想化的 4 层油藏活塞式水驱示意图,假设层内均质,纵向上存在 4 个不同渗透率的油层,且渗透率 $K_1 > K_3 > K_4 > K_2$ 。从图 1-1(a)可以看出,油井见水后平面上和纵向上仍存在一部分油藏体积未被注入水波及。从图 1-1(b)可以看出,随着注水时间的增加(从 t_1 — t_3),注入水的波及面积越来越大,当注入水在生产井突破后直到油井完全水淹(如 t_3)仍有部分面积尚未被注入水波及。对于实际油层,由于黏性力作用,油藏非均质性等因素产生黏性指进和舌进现象,使注入水平面波及效率更低。

1) 面积波及系数

面积波及效率(E_{vA})定义为注入流体波及的面积与油藏面积的比值。如图 1-1(b)中, t_2 时刻面积波及效率为双阴影部分面积与总正方形面积的比值。即:

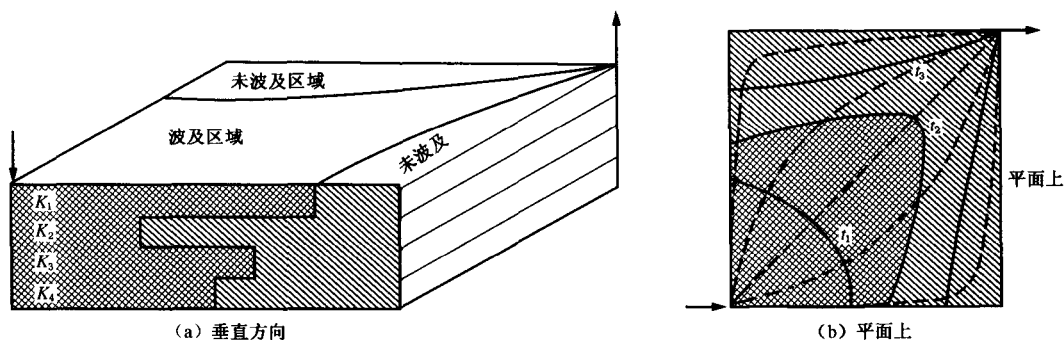


图 1-1 理想化的 4 层油藏活塞式水驱示意图

$$E_{vA} = \frac{A_s}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 A_s ——注入流体波及的面积；

A ——油藏面积。

影响面积波及系数的主要因素有流度比和井网两个参数。

(1) 流度比的影响：

流度(λ)定义为流体的相渗透率(K_i)与该相流体的黏度(μ_i)的比值,即：

$$\lambda = K_i / \mu_i \quad (1-6)$$

流度是反映流体流动能力大小的量度,对于水驱油来说,一般原油黏度要比注入水的黏度大得多,也就是说,水的流度要比油的流度大得多,即水比油更易流动。

流度比(M)是指驱替相(如注入水)流度与被驱替相(如原油)的流度比值。水驱油的流度比为：

$$M = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} = \frac{K_w / \mu_w}{K_o / \mu_o} = \frac{K_w \mu_o}{K_o \mu_w} \quad (1-7)$$

相应地,注气的流度比为：

$$M = \frac{\lambda_g}{\lambda_o} = \frac{K_g / \mu_g}{K_o / \mu_o} = \frac{K_g \mu_o}{K_o \mu_g} \quad (1-8)$$

流度比对面积波及效率的影响很大,而且面积波及效率随流度比增加而降低。因此,当驱替相与被驱替相流度比小于 1 时,定义为有利流度比;反之,当驱替相与被驱替相流度比大于 1 时,定义为不利流度比。

一般来说,地下原油的黏度大于地下水黏度,即 μ_o 大于 μ_w 。而且油相渗透率(K_o)随着含水饱和度增加而减少,相反,水相渗透率(K_w)随含水饱和度增加而增大。因此,在油藏注水后 K_w 上升, K_o 下降。这样由流度比定义可知,水驱油流度比大于 1,而且随着注水时间增加,水驱油流度比越来越大。

图 1-2 为一个 1/4 的五点井网中不同流度比(M 为 2.4 至 71.5)下水驱平面波及效果

图。从中可以看出,随着流度比的增加,注入流体突破时波及面积减少;随着流度比的降低,注入流体前缘推进较均匀,突破时波及面积增大。通过降低流度比,可以大大地提高水驱面积波及系数。

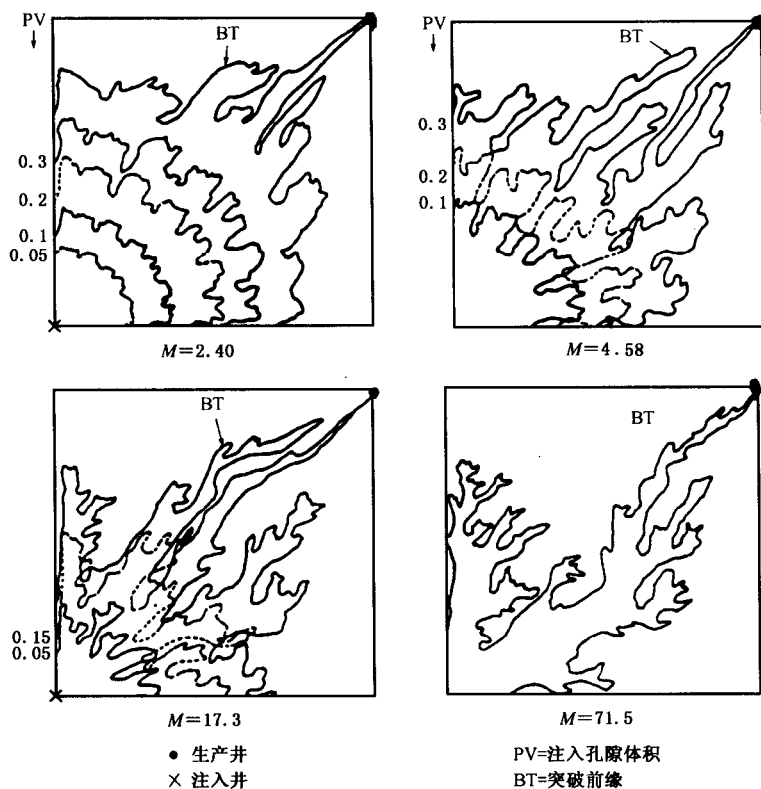


图 1-2 五点井网不同流度比的水驱平面波及效果图

图 1-3 中曲线表明,相同的注入孔隙体积(PV 数),不利的流度比(M 大于 1)下的面积波及系数小;而有利流度比(M 小于 1)下的面积波及系数大,随流度比的增加,面积波及效率降低。

图 1-4(a)显示了面积波及系数随流度比的变化规律。图 1-4(b)显示了不同含水时面积波及系数与流度比的关系。从图 1-4(b)可以看出,对于平面均质的五点井网来说,如果水驱油流度比为 10,当油井含水上到 90% 时,面积波及系数为 0.8,即有 20% 面积没有被注入水所波及。

从公式(1-7)可知,在注水时可以通过增加注入水的黏度(μ_w),降低水相相对渗透率(K_w),来降低水驱油流度比,提高注入水的面积波及系数。例如在注入水中加入聚合物,不仅可以增加注入水的黏度,而且还可以降低水相相对渗透率,大大地改善水驱油流度比,提高波及效率。在注气采油中,可以通过加入表面活性剂产生泡沫,来增加气相的黏度,降低气相流动能力和渗透率。在注蒸汽中,同样可以采用蒸汽泡沫技术改善注入蒸汽的面积波及效率。

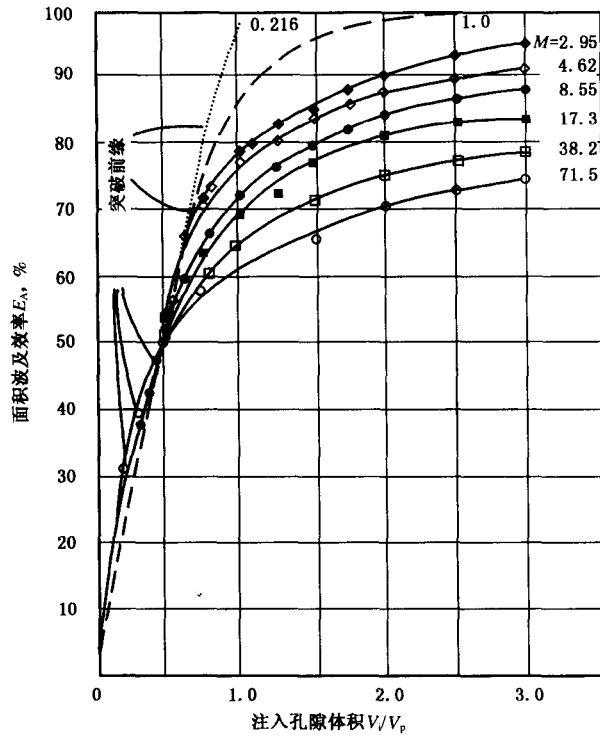


图 1-3 流度比对面积波及效率的影响

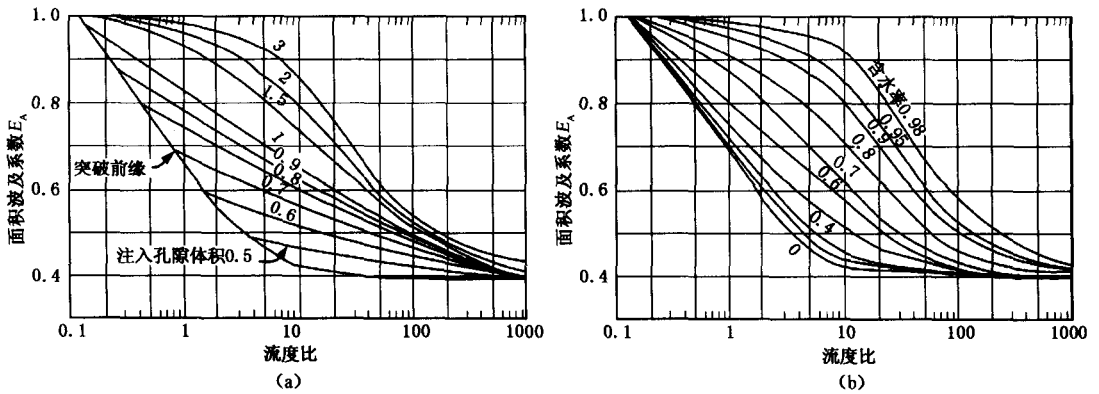


图 1-4 流度比对面积波及效率的影响

因此,对于水驱、注气或注蒸汽来说,流度控制方法有:

- ① 聚合物驱;
- ② 弱凝胶调驱;
- ③ 水、气交替注入;
- ④ 泡沫法,如蒸汽泡沫、 CO_2 泡沫。

(2) 井网影响:

图 1-5 为规则的注采井网示意图。其中常用的有四点、五点、七点和九点井网,如果油藏较小、油藏形状不规则,而且断层较多,井网就不会是规则的。不同的井网模式导致不同的波及效率。表 1-1 为不同井网油井见水时的波及系数。

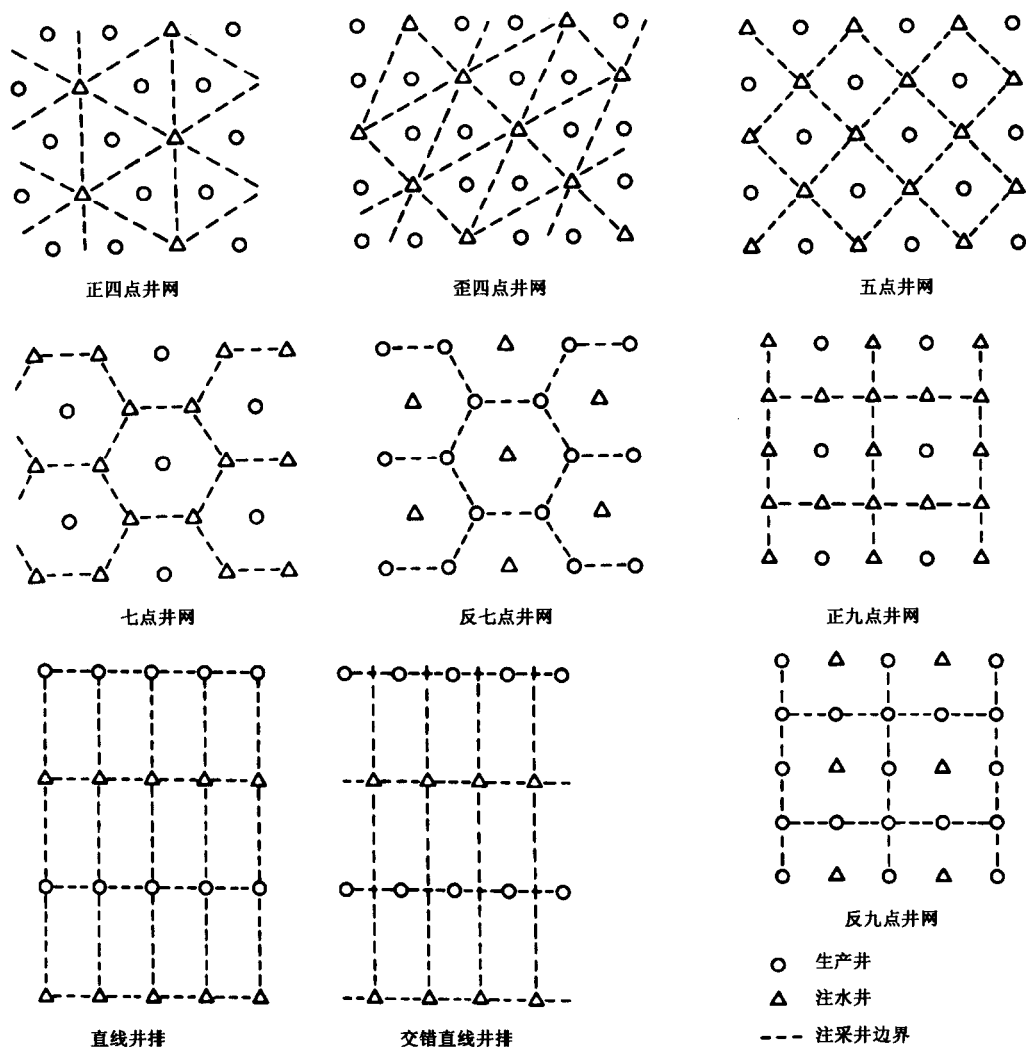


图 1-5 不同注采井网示意图

表 1-1 中数据是在流度比为 1 的条件下获得的。表中结果显示,七点井网的面积波及系数较高,为 74% ~ 82%;九点井网见水时的面积波及效率为 49% ~ 78%;而直线和交错排列井排的波及效率取决于井排之间的距离和井排上井间距离,当二者比值为 1 时,见水时交错直线井排的面积波及系数为 75%。见水后波及面积会随着注水时间增长而增大,尽管含水上升,但同时采收率也随之增加。

表 1-1 不同井网见水时的波及系数

井网类型	$E_{VA}^{br}, \%$	采油/注水井比
规则五点井网	68 ~ 72	1
反五点井网	68 ~ 72	1
规则七点井网	74 ~ 82	2
反七点井网	74 ~ 82	1/2
九点井网	49 ~ 78	1/3
直线排列井网	57	1
交错排列井网	75	1

2) 垂向波及系数

垂向波及系数定义为注入流体在油层纵向上波及的有效厚度与油层总的有效厚度的比值,其表达式为:

$$E_{vv} = \frac{h_s}{h} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 h_s ——注入流体波及的平均有效厚度;

h ——油层总的有效厚度。

影响垂向波及系数的主要因素有驱替流体与被驱替流体的密度差引起的重力分离效应、流度比、非均质性以及毛管力等参数。

图 1-6 表示具有不同渗透率的 6 个油层水驱突破时的示意图。由于层间存在渗透率差异,注入水在垂向的波及效率较低,除了上层被完全波及之外,其他层位只有少部分被波及。提高该油层波及效率的方法是降低上层的渗透率,即通过注入黏度较高的流体,增加该层位的阻力,从而提高其他油层的波及效率。

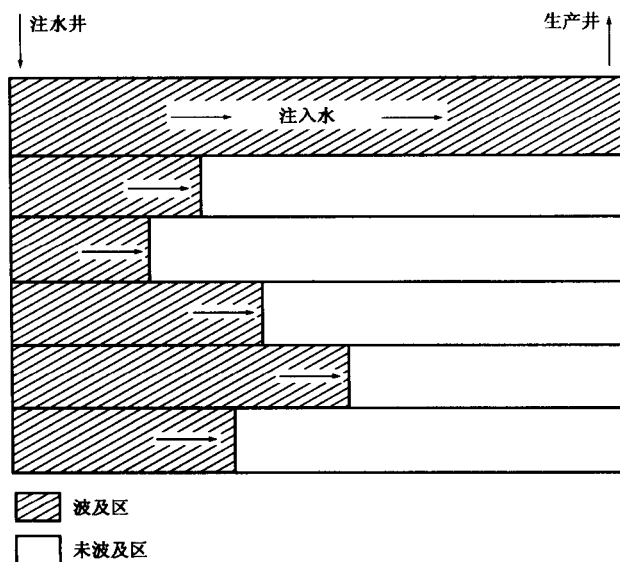


图 1-6 不同渗透率油层水驱波及示意图

(1) 重力分离效应:

驱替相与被驱替相的重力分离效应可用无因次参数 $R_{v/g}$ 表示:

$$R_{v/g} = \frac{v\mu_d}{Kg\Delta\rho} \frac{L}{h} \quad (1-10)$$

式中 v ——达西速度;

μ_d ——驱替相黏度;

K ——岩石渗透率;

$\Delta\rho$ ——驱替相与被驱替相的密度差;

L ——注采井间距;

h ——油层厚度;

g ——重力加速度;

$R_{v/g}$ ——黏滞力与重力的比。

图 1-7 表示不同流度比下注入流体突破时垂向波及系数与 $R_{v/g}$ 关系。从图中可以看出, 流度比越大, 垂向波及系数越小; 流度比越大, 重力分离的影响越小。例如, 当 $M=50$ 时, $R_{v/g}$ 几乎不影响垂向波及效率。对于一定的流度比, 驱替流体与被驱替流体密度差越大, $R_{v/g}$ 越小, 垂向波及系数越小。因此, 在注气(如注 CO_2)和注蒸汽过程中, 由于注入气体与原油间的密度差较大, 导致气窜现象严重, 垂向波及系数小。从流度比定义式(1-7)、式(1-8)及 $R_{v/g}$ 定义式(1-10)可以看出, 提高垂向波及系数的方法有:

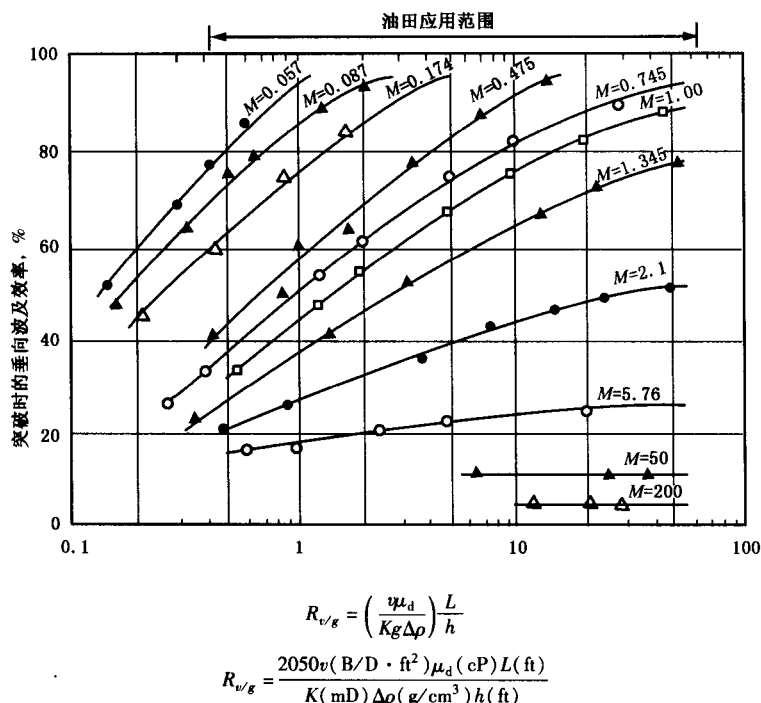


图 1-7 不同流度比下垂向波及系数与 $R_{v/g}$ 关系

① 减少驱替相与被驱替相密度差,提高 $R_{w/g}$ 值。例如水/气交替注入技术和蒸汽泡沫、二氧化碳泡沫等;

② 提高驱替相流体的黏度,降低驱替相渗透率。例如加入聚合物可以增加水相黏度,降低水相渗透率[由于聚合物吸附(滞留)作用],或者聚合物凝胶调整渗透率级差。

(2) 流度比影响:

从上述分析可知,要提高垂向波及系数,也可以通过改善流度比的方法来达到,如果水驱油流度比能够保证 M 不大于 1,那么,垂向波及系数可以大幅度提高。

(3) 垂向非均质性:

储集层一般都是沉积岩,油藏是有许多小油层组成,这些油层在纵向上并不是完全均质的,各小层的渗透率有较大的差别,即层间存在非均质性。在实际应用中,把岩心分析所得的渗透率值,按递减顺序从大到小排列,把超过某渗透率值的岩样数目进行累加统计,绘在渗透率对数—正态概率分布坐标纸上,通过这些点可以画出一条直线段(如图 1-8),那么可以用 Dykstra 和 Parsons 定义的渗透率变异系数来确定油层的纵向非均质性。Dykstra 和 Parsons 渗透率变异系数(V_{DP})定义为:

$$V_{DP} = \frac{K_{84.1} - K_{50}}{K_{50}} \quad (1-11)$$

式中 K_{50} ——累积岩样数占 50% 所对应的渗透率值;

$K_{84.1}$ ——累积岩样数占 84.1% 所对应的渗透率值;

V_{DP} ——Dykstra 和 Parsons 渗透率变异系数。

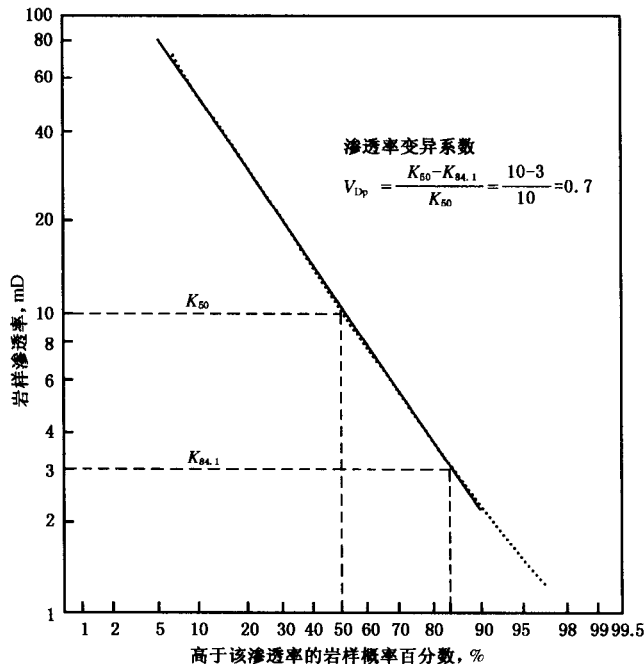


图 1-8 Dykstra & Parsons 渗透率变异系数的确定