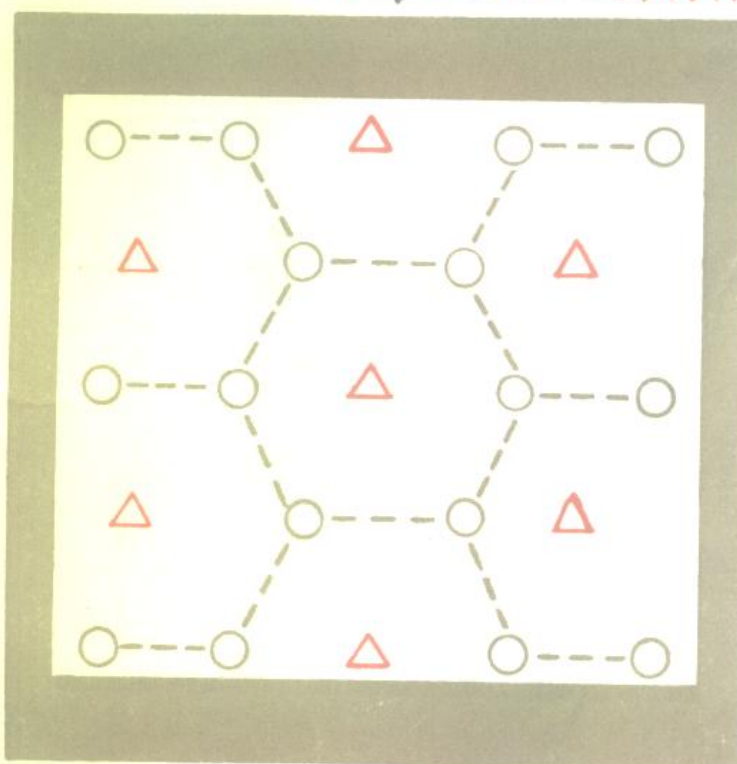


海水

〔美〕 G. 鲍尔. 威尔海特



石油工业出版社

PETROLEUM INDUSTRY PRESS

注 水

〔美〕G.鲍尔·威尔海特

刘民中 唐金华 译 张朝琛 校

石 油 工 业 出 版 社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书叙述了注水的基本原理和方法;介绍了注水设计的方法和过程;给出并阐述了各种注水模型的机理和设计程序以及动态预测,并说明了各种注水方式的适用条件及影响因素。本书还描述了注水过程中的油藏地质及实例。书中附有不同程度的例题和习题,供读者消化吸收。

本书还适用于油藏工程专业高年级学生和现场油藏工程师、地质师阅读。

11-23-152

G. Paul. Willhite

Water flooding

The Society of Petroleum Engineers

TX 1986

*

注 水

(美) G. 鲍尔, 威尔海特

刘民中 唐金华 译 张朝琛 校

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 $31\frac{1}{2}$ 印张 794 千字 印 1-1800

1992 年 2 月北京第 1 版 1992 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0648-0/TE·616

定价: 16.10 元

前 言

这本书是为学习石油工程的高年级学生写的教科书。象很多书一样，它的编写工作也是从为堪萨斯大学开设“二次采油”课程收集文章和积累笔记而开始的。有机会将这些材料编纂成一本相互协调的有条理的教科书，完全是石油工程师协会（SPE）教科书委员会寻求作者写一本提高原油采收率（EOR）的教科书的直接结果。在从事这项工作的年月里，把原来提纲中的“注水”一章扩大成了一本更为需要的课本，以便与广泛应用的由 F.F.Craig Jr.写的石油工程师协会专著《油田注水开发工程方法》[●]以及石油工程师协会重版文选 2A 号《注水》（实例和参考文献汇编）这两本书相呼应。

在本书中，我想从基本原理开始，逐步阐述注水问题。因为，我坚信，基本概念可普遍适用于任何拟议中的或正在实施的注水项目。其中有许多概念也可移用于所有其他提高原油采收率方法。并不是所有的基本概念都一清二楚，尤其是从微观水准上来说，更是如此。遇到这些情况时，我都介绍了目前的理解，并认识到还有多种不同的见解。这在讨论油藏润湿性和粘性指进的确定时，尤其明显。在第二到第六各章的末尾，都列举了很多难度不同的习题。其中有些可以用手持计算器求解，但是，很多需要编制一些简短的计算机程序。少数还需要用文献中发表的程序以求解。在所有情况下都是着重在理解基本概念和（或）应用这些概念去解决注水问题。

本书的一个目标是为注水设计拟订一套系统的步骤。对于学生和青年工程师来说，设计经历乃是一种重要的成长机会。在这种经历中，我们必须设法解决理论与实践之间的差异、缺少资料或油藏描述还不够好等问题。人们越来越认识到油藏比许多工程师和地质师们曾经设想的要复杂得多。为此，在第七章中，对油藏地质学及其在注水设计和实施中的作用，进行了广泛的论述。在这一方面，我要感谢 Jim Ebanks Jr.，我多年的朋友和地质学家，他乐于就这一课题向试图充分掌握地质知识的工程师提出意见、鼓励和批评，以使用正确的假设来取代猜想。

在本书的编写过程中，我阅读了数百篇有关注水各个方面的文献。谁都不可能有这样全面的经历，如果不从深入吃透如此众多的科学家和工程师的工作中得到教益，那么他就只好在往往尚不清晰的环境下去摸索发展和理解这种注水方法。这些文献中，有很多虽然没有纳入本书的内容，但仍然是值得重视的。

著书是一件孤独而又需要做的工作。我的努力得到很多人的支持。在我于休假期撰写本书的某些部分时，我在堪萨斯大学化学与石油工程系的同事替我教课。化学与石油工程系 695 班我的学生们，在我写这本书的几年里，在评议手稿、习题和如何讲授方面，做了不少贡献。我的几位同事还指出了一些不可避免的常常是不知不觉地混进书稿和校样中的小错误。我在工业界和其他大学的同事也给了我相当大的帮助。Bill Brigham 提供了他的注水课程的授课笔记，包括若干很好的习题。Jim Mc Caleb 和 Jim Ebanks Jr.对第七章做了精心审

●原文为 The Reservoir Engineering Aspects of Waterflooding, 1971年版，后由石油化工出版社于1977年出版其中

译本 译名改为《油田注水开发工程方法》——译者

定。在本书的适当章节中提到的其他同事，提供了不少在公开发表的文献中得不到的习题、图幅和资料。我很幸运，在加利福尼亚州 La Habra 市雪夫隆 (Chevron) 油田研究公司渡过了我的 1984~1985 年度的休假期。只有在那里，我才能够完成本书的最后细节。

特别值得一提的是在本书的编写过程中不断地给予支持的堪萨斯大学的若干位人士。Ruth Sleeper、Emily Chung 和 Debbie Fowler 等打印了部分原稿。所有的绘图和照相都是由 Vera Schon 完成的。在达拉斯，石油工程师协会出版部很多成员的辛勤工作使我的稿件得以按期出版。Christine Butch 和 Holly Hargadine 给予我特殊的帮助。对石油工程师协会教科书委员会的两位编辑，Bud Staggs 和 Kent Thomas 的贡献，表示感谢。

G.鲍尔. 威尔海特

目 录

引论	(1)
第一章 注水的历史背景	(2)
1.1 引言	(2)
1.2 注水的发展过程	(2)
1.3 一次采油	(3)
参考文献	(6)
第二章 非混相驱替的微观效率	(7)
2.1 引言	(7)
2.2 流体同岩石相互作用的基本原理	(7)
2.3 推测多孔介质中流体分布的方法	(14)
2.4 多孔介质中多相渗流原理	(28)
2.5 剩余油饱和度	(43)
2.6 剩余油的可动性	(59)
参考文献	(75)
第三章 线性注水的宏观驱替效率	(83)
3.1 引言	(83)
3.2 多孔介质中多相渗流方程的建立	(83)
3.3 线性系统中流体渗流方程的解	(86)
3.4 非稳定一维驱替的前缘推进方程式	(92)
3.5 预测恒速注水时线性水驱动态	(99)
3.6 压降恒定时的线状注水	(106)
3.7 前缘推进方程式的恒速和恒压解的等价性	(115)
3.8 考虑了可动的初始含水饱和度的线状注水	(116)
3.9 已衰落油藏的线状注水动态	(118)
3.10 依据线性驱替数据的分析确定相对渗透率曲线	(124)
3.11 控制线状注水驱替效率的因素	(132)
3.12 前缘推进方程解的局限性	(137)
3.13 用数值模型求解线状驱替方程式	(141)
参考文献	(173)
第四章 二维平面非混相驱替	(176)
4.1 引言	(176)
4.2 二维平面驱替中的流体渗流方程	(176)
4.3 五点法井网内的驱替	(178)
4.4 依据实验室标配模型——CGM 模型导出的相互关系	(179)
4.5 流管模型	(190)

4.6	五点法井网的 CGM 模型与流管模型对比	(207)
4.7	用二维数值模型预测面积驱替效率	(208)
4.8	二维平面数值模型的局限性	(210)
	参考文献	(221)
第五章	线性和平面模型中的纵向驱替	(224)
5.1	引言	(224)
5.2	均质层状油藏的二维驱替——分层模型	(224)
5.3	线状油藏的重力分异与层间窜流	(235)
5.4	物性按厚度平均的二维渗流近似解	(236)
5.5	用实验室标配模型预测纵向驱替效率	(257)
5.6	在线状系统中有重力分异和 / 或层间窜流时二维驱替的数值模拟	(268)
5.7	粘性指进	(278)
5.8	用三维模型和油藏模拟器预测注水动态	(281)
5.9	小结	(291)
	参考文献	(310)
第六章	注水设计	(314)
6.1	引言	(314)
6.2	设计要素	(314)
6.3	油藏描述	(314)
6.4	选择可能的注水方式	(315)
6.5	注水速度	(316)
6.6	注水动态预测	(339)
	参考文献	(373)
第七章	油藏地质学在注水设计和实施中的作用	(376)
7.1	引言	(376)
7.2	说明油藏描述重要性的现场实例	(376)
7.3	油藏描述	(394)
7.4	砂岩储集层的沉积环境	(396)
7.5	碳酸盐岩储集层的沉积环境	(415)
7.6	油藏描述之进程	(432)
	参考文献	(468)
附录 A	计算机程序	(477)
附录 B	面积注水的流管参数, Higgins-Leighton 流管模型	(489)
附录 C	以多种度量单位表示的通用方程式	(494)

引 论

在为注水设计奠定其科学依据之前，注水作为一种技艺，已实践了多年。这种认识上的提高，主要是从四十年代后期和五十年代的各公司和大学所做的广泛研究与发展工作，以及从六十年代和七十年代的现场经验中得到的。此书通过对多孔介质中多相渗流的基本认识，来构思注水设计问题。

在编写本书时，我想努力介绍一些不靠数值模拟而能揭示二维和三维驱替过程的基本特征的概念。第一章介绍注水的发展历程，并且评述一次采油机理。两相渗流和微观驱替效率的概念放在第二章中阐述。第三章在介绍注水时，是将其视为线性驱替过程来研究的。第四章通过分析各种面积井网的注水动态，概述二维驱替问题。通过将线性系统的驱替概念发展为面积注水的办法，引入了流管模型作为一种注水设计的工具。在第五章中对非均质油藏首先作为非连通层状系统处理。层间交渗问题，通过建立拟相对渗透率概念可以近似求解。虽然数值模拟不属于本书的讨论范围，但它在说明数值模拟的能力时，仍然提到了应用数值模拟解决一维、二维和三维驱替问题的实例。

第六章讨论了一种注水设计的思路。作为注水设计的一个主要组成部分，我强调要建立一个模型以模拟注水速度和驱替动态。按照由易到难的次序，分别介绍了从经验方法到数值模拟的各种模型。在第七章中，将现场经验和有关的地质解释综合在一起，以说明地质解释在注水设计和实施中的作用。许多注水设计步骤可以写成小型计算机程序。本书选择了一些计算机子程序，以便帮助学生经过一定的努力后，写出更复杂的设计程序。

第一章 注水的历史背景

1.1 引言

提高原油采收率 (EOR), 是指从油藏中采出比一次采油法采出更多石油的某种方法⁽¹⁾。在一次采油中, 原油是靠油藏的天然能量驱向产油井的。油藏的天然能量来自流体和岩石的膨胀、溶解气驱、重力排替以及供水层水的侵入。

大多数 EOR 方法都是向油藏注入一种流体 (气体或液体)。注水是应用最为广泛的 EOR 方法, 它是本书的主题。其他的 EOR 方法, 计划将来另立卷阐述。

本章由两个部分组成。首先, 概述注水的发展过程, 然后评述一下一次采油机理, 以便搞清楚考虑要注水的油藏的初始条件。

1.2 注水的发展过程

Edwin L. Drake 于 1859 年 8 月 27 日在宾夕法尼亚州的 Titusville 发现原油, 标志着石油时代的开始。虽然这一口油井每日大约只产 10 桶 (1.6 m^3) 原油。但是, 不到两年里, 完钻的其他井日喷油却以千桶计⁽²⁾。这些宾夕法尼亚州的浅油藏, 随着油藏能量的衰竭, 产量下降很快。采收率只占估算的原油地质储量的很小的百分数。早在 1880 年, Carll⁽³⁾ 就提出, 将水注入油藏把油驱向生产井从而提高原油采收率的可能性。

实行注水好象是偶然开始的。在宾夕法尼亚州的 Bradford 油田的注水就是如此⁽⁴⁾。继 1880 年的高产期后, Bradford 油田的很多井都停弃了。有些停弃井是采用拔套管而不封堵的办法, 而在其他井, 则将套管留在井中, 套管在井下会腐蚀掉。在这两种情况下, 似乎都有浅层淡水流入产油层段。可能早在 1890 年, 经营者意识到进入产层的水可增加产油量时, 就开始注水了。到了 1907 年, 实施注水已对 Bradford 油田的产量有明显的影晌。最初的注水方式称为环状注水, 即向一口井注水, 直到周围的产油井水淹为止。这些被水淹的产油井转为注水井, 形成一个扩大的“环状”水驱前缘。很多经营者都曾经反对向产油砂层注水。宾夕法尼亚州通过了一条法令, 要求封堵停弃井和水淹井以防水进入油层和气层, 曾起着制止注水的作用, 因此, 注水是秘密地进行的。1921 年, 宾夕法尼亚州立法部门承认了往 Bradford 油田的产层注水的合法化。

1921 年后, 实施注水的规模迅速扩大, 环状注水法也被“行列”注水所代替。行列注水时, 两排生产井等距离地错开排列在注水井排两侧⁽⁴⁾。到 1928 年, 行列注水就被一种新的称为“五点法”的注水井网所代替, 因为它在外形上与骨牌上的五点布局相近⁽⁴⁾。Bradford 油田的注水相当成功。图 1.1 示出了 Bradford 油田一百多年开采史上的产量变化情况。从这个油田来看, 注水对产量的影响是明显的。

因为在油田一次采油枯竭后, 注水又采出了第二批原油, 所以称注水为二次采油。这种方法慢慢地在各产油区得到了推广。据报道, 1931 年在俄克拉何马州, 1935 年在堪萨斯州以及 1936 年在得克萨斯州就已实施注水。

注水进展缓慢有几个原因。在早期，人们对注水了解很少。大约在采用注水的同时，注气也发展起来了，而且在有些油藏成了一种很有竞争性的开采方法。在美国，由于在二十年代和三十年代相继发现一些大油田，导致在几个州实行按比例配产。产油能力大大超过了市场需求。于是，很多油藏的一次采油都受到市场需求的制约。

在注水受干预的年代里，世界各地都发现了大油气田，限额产量仍超过市场的需求。大量进口低价原油也延长了油藏一次开采期限，

延迟了注水的实施。在四十年代末和五十年代初，随着油藏日趋接近经济极限，而经营者又想要增加可采储量，于是对注水越来越感兴趣。到1955年⁽⁵⁾，估计在美国，全部 6.6×10^6 桶/日 (10^6 米³/日) 的日产油量中，有 750000 桶/日 (119200 米³/日) 的原油是靠注水开采出来的。在世界各地，注水得到广泛的应用。在美国，目前有一半的原油被认为是由注水开采出来的。

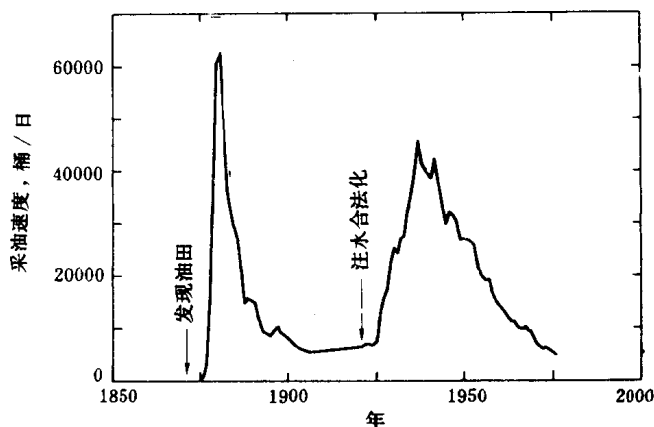


图 1.1 Bradford 油田的开采历程

1.3 一次采油

能够用油藏的天然能量驱出的油量，随油藏类型不同而变化。根据油藏能量的主要来源，把油藏分为五大类型，这就是：①水驱油藏；②溶解气驱油藏；③流体膨胀油藏；④气顶驱动油藏以及⑤重力排替油藏。

1.3.1 水驱油藏

水驱油藏在油藏与饱含水的多孔岩石（称为供水层）之间，有水力连系。供水层可以是位于整个油藏或局部油藏的下方。但供水层经常是在油田的边缘，如图 1.2 所示。在供水层中的水是被压缩的。一旦由于采油而使油藏压力下降，水就膨胀，在油藏/供水层边界处形成天然水驱。供水层内岩石的压缩性同样也供给油藏能量。当供水层十分大，并且含有充足的能量时，精心管好流体采出速度可以使整个油藏都被“水驱”的。在有些水驱油藏，采收率达到原始的石油地质储量（OOIP）的 70% 到 80% 是可能的。油藏的地质情况、非均质性和构造位置都是影响采收率的重要变量。在世界各地都已发现了强水驱油藏。如东得克萨斯（East Texas）油田、堪萨斯州的 Arbuckle 油藏以及怀俄明州的 Tensleep 油藏。

有些水驱油藏与能量有限的供水层连通。除非从钻井或其他记录中获得了有关这一含水层的众多地质资料，否则，油井进入一次开采期相当时间，仍无从知道这一供水层的范围和提供油藏能量的能力。通常，油藏压力受流体采出量的控制。水的侵入量是可以计算的。一定开采速度下的油藏压力水平，可据以衡量水驱能力的大小。如果供水层不能供给足够能量以满足既能达到预定的流体采出速度而又保持住油层压力的话，那么就可能要采用边部注水方案来补充油藏的天然能量。这种称为保持压力的方案就是注水。可以想到，有强供水层的

油藏一般很少用注水作为后备措施。然而，油层非均质性可能限制天然水驱在油藏某一部分的作用。

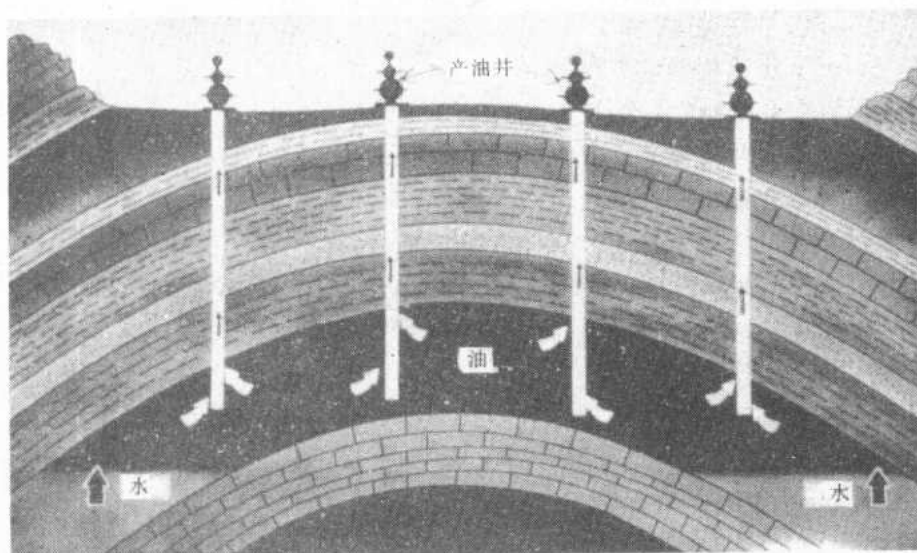


图 1.2 水驱油藏

1.3.2 溶解气驱油藏

高压下的原油可能含有大量的溶解气。当由于采出流体而使油藏压力下降时，气从溶液中释出，并将油从油层驱向生产井，如图 1.3 中所示。

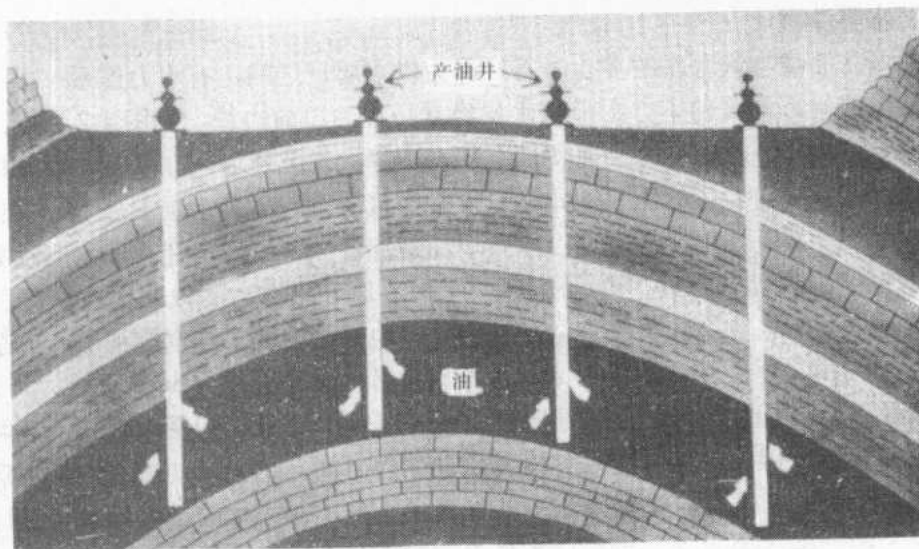


图 1.3 溶解气驱油藏

溶解气驱的效率取决于溶液中含气量、岩石和原油的性质以及油藏的地质构造。溶解气驱法的采收率低，为原始石油地质储量的 10% 到 15%。采收率之所以低，是因为在油藏中气比油更易流动。随着压力的下降，气体渗流的速度比油更快，导致油藏能量迅速衰竭，这从油田生产的气 / 油比 (GOR) 的增加即可看出。溶解气驱油藏通常都可作为良好的注水对象。

1.3.3 未饱和油藏

当原油所含的气量比在所处油藏压力和温度下所能饱和的气量要少时，这种原油就是未饱和的。当原油远未饱和时，大量的油藏能量就以流体和岩石压缩性的形式储存了下来。若从未饱和油藏采出流体，油层压力在降到泡点压力之前往往下降很快，尔后，溶解气驱成为驱替流体的能量来源。运用油层流体分析资料、PVT 特性和油层压力数据，可鉴别出未饱和油藏。就注水保持较高油层压力和提高原油采收率来说，这些油藏是良好的注水对象。

1.3.4 气顶驱动油藏

当油藏具有庞大气顶时（如图 1.4 所示），会有大量的能量以压缩气形式储存了下来。随着流体从油藏采出，气顶膨胀，以气驱并伴随重力排替方式将原油驱向井底。气顶膨胀程度受油藏开采所需的压力水平和气锥进到生产井后产气量的控制。带有大气顶的油藏，一般说来都不作为注水的好对象。这类油藏有些可以靠向气顶注气以保持压力。下面垫有水层上有气顶的油藏，可以采用如图 1.5 所示的联合注气和注水方案。

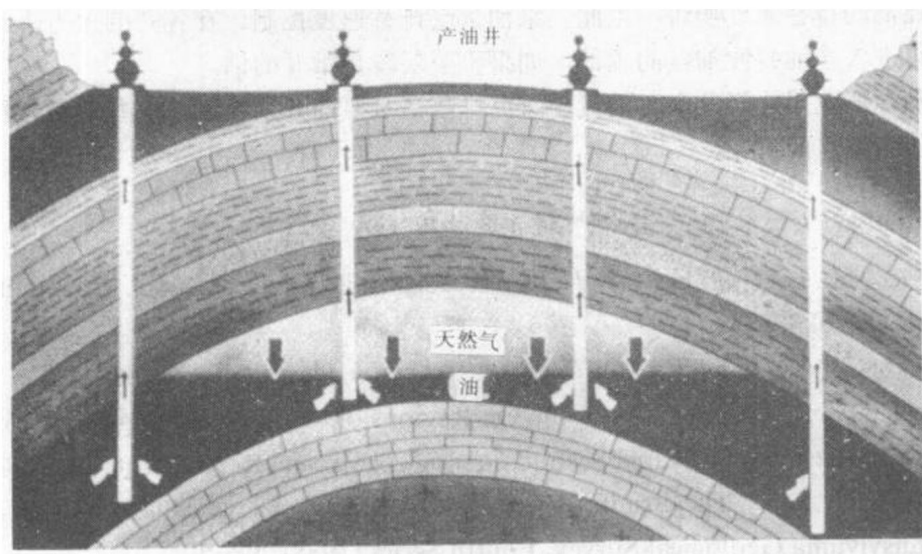


图 1.4 气顶驱动油藏

当考虑联合注气 / 注水方案时，一定要小心从事，因为存在着把原油驱进气顶区，直至注水结束时仍被拘留在那里的风险。

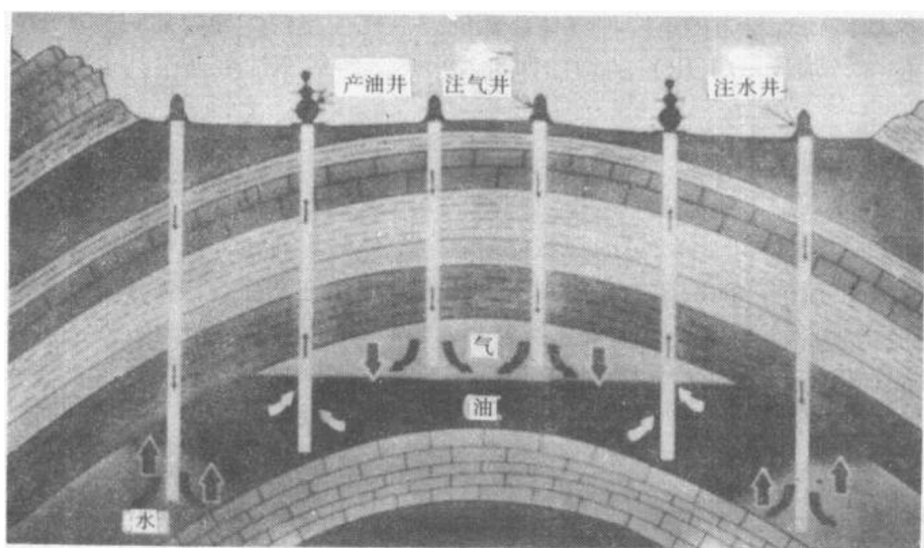


图 1.5 注气和注水联合驱动方案

1.3.5 重力排替油藏

在纵向连通好的厚油层或陡倾的油藏，重力排替也许是主要的采油机制。重力排替是一个缓慢的过程，因为气体必须运移到构造上部或地层顶部以充填先前被油占据的空间。气的运移速度比油的排替速度要快，因此，采油量受排替速度控制。在各井的压力降到常压的油藏，空气可进入产油井段油藏的顶部，如果整个层段是敞开的的话。

在加利福尼亚州的好几个大油藏，重力排替是重要的开采机制。这些油藏含重质油，因而也不宜作为注水的对象。

参 考 文 献

1. Hayes, H. J. *et al*: *Enhanced Oil Recovery*, Natl. Pet. Council, Washington, D. C. (Dec. 1976) 3.
2. Dickey, P. A.: "The First Oil Well," *J. Pet. Tech.* (Jan. 1959) 14-26.
3. Carll, J. F.: "The Geology of the Oil Regions of Warren, Venango, Clarion and Butler Counties," *Pennsylvania Second Geological Survey, Report III* (1880) 263.
4. Fettke, C. R.: "The Bradford Oil Field, Pennsylvania and New York," *Bull. M21*, *Pennsylvania Geological Survey, Fourth Series* (1938) 298-301.
5. Sweeney, A. E. Jr.: "A Survey at Secondary Recovery Operations and Methods Employed in the United States," paper from the Interstate Oil Compact Commission presented at the 1957 Illinois Oil and Gas Assn. Meeting, April 11.

第二章 非混相驱替的微观效率

2.1 引言

油藏中非混相流体（油/水、油/气、水/气或油/水和气）的存在，改变了岩石传输流体的能力。在这一章中，我们要研究用来阐明多孔岩层中非混相流体的分布与渗流特征的一些基本概念。

如果两相或多相流体，已经过足够长的时间充分地混合达到相平衡之后，仍形成明显的界面的话，那么就认为这些流体在某一特定温度和压力下是互不混相的。在几乎所有的油藏和地面条件下，水和油都是不混相的，因为油溶于水和水溶于油的能力都很小。这种广义的非混相性也包括原油和气处于平衡的情况。在这种场合中，原油含有其比例由平衡分配系数确定的天然气的全部组分，有时将这些体系描述成部分混相，因为有相当数量的气可以溶于油中，不过，这取决于温度、压力和组分。

2.2 流体同岩石相互作用的基本原理

2.2.1 界面张力 (IFT)

两相间的界面是一个有限溶解度的区域，这一界面层最多也只有几个分子厚。可以把它视为是一种相的边界，其起因是由于同相分子间的吸力大于不同相的分子之间所存在的吸力所引起。

界面张力是界面的一种基本热力特性。其定义为增加单位的界面面积所需的能量。图 2.1 所示为用来测定油/水界面处的界面张力的吊环张力仪。将放置于界面处的环靠所施加的力吊起。如图 2.2 所示，将环经过该界面上拉，其界面面积就增大。在环吊出界面时所用的力，除以该环的周长（可用一个几何因子予以校正）就是界面张力。其他测定界面张力的方法包括悬滴法⁽¹⁾、垂滴法⁽²⁾和旋滴法⁽³⁾。

原油/水系统的界面张力典型值示于表 2.1 中⁽⁴⁾。油和水之间的界面张力在 77°F (25°C) 温度下通常为 10 到 30 达因/厘米（毫牛/米）。液体与其蒸汽（或空气）之间的界面张力被称为表面张力。石蜡族烃类的表面张力同分子量和温度的相关关系示于图 2.3 中⁽⁵⁾。

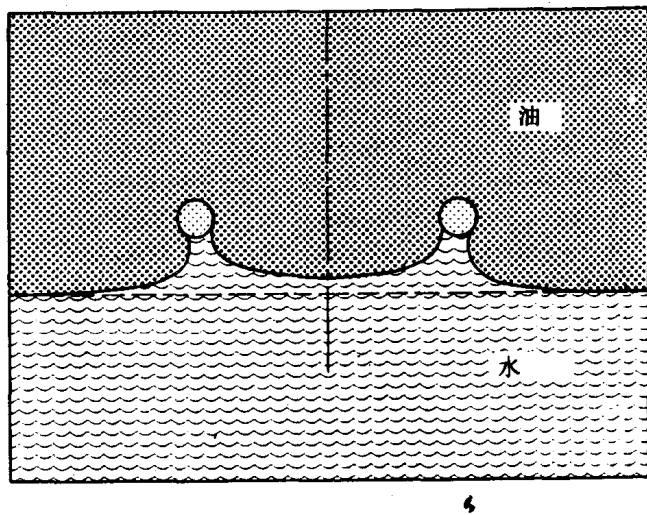


图 2.1 界面张力测定中界面膜的撑伸

表 2.1 原油的界面张力⁽⁴⁾

油田名称	油 层	州 (国)	原油粘度	界面张力
			厘泊 (毫帕·秒)	达因/厘米(毫牛/米)
West Delta	Offshore	Louisiana ^①	30.4	17.9
Cayuga	Woodbine	Texas ^②	82.9	17.9
Fairport	Lansing	Kansas ^③	5.3	20.8
Bayou	Choctaw	Louisiana	16.1	15.6
Chase-Silica	Kansas City	Kansas	6.7	19.6
Hofra	Paleocene	Libys ^④	5.1	27.1
Black Bay	Miocene	Louisiana	70.8	17.7
Bar-Dew	Bartlesville	Oklahoma ^⑤	9.0	17.7
Bar-Dew	Bartlesville	Oklahoma	6.8	21.4
Eugene Island	Offshore	Louisiana	7.4	16.2
Cambridge	Second Berea	Ohio ^⑥	15.3	14.7
Grand Isle	Offshore	Louisiana	10.3	16.1
Bastian Bay	Uvigerina	Louisiana	112.2	24.8
Oklahoma City	Wilcox	Oklahoma	6.7	20.1
Glenpool	Glen	Oklahoma	5.1	24.7
Cumberland	McLish	Oklahoma	5.8	18.5
Allen District	Allen	Oklahoma	22.0	25.9
Squirrel	Squirrel	Oklahoma	33.0	22.3
Berclair	Vicksburg	Texas ^⑦	44.5	10.3
Greenwood-Waskom	Wacatoch	Louisiana	5.9	11.9
Ship Shoal	Miocene	Louisiana	22.2	17.3
Gilliland	—	Oklahoma	12.8	17.8
Clear Creek	Upper Bearhead	Louisiana	2.4	17.3
Ray	Arbuckle	Kansas	21.9	25.3
Wheeler	Ellenburger	Texas	4.5	18.2
Rio Bravo	Ril Bravo	California ^⑧	3.8	17.8
Tatums	Tatums	Oklahoma	133.7	28.8
Saturday Island	Miocene	Louisiana	22.4	31.5
North Shongaloo-Red	Tokio	Louisiana	5.2	17.7
Elk Hills	Shallow Zone	California	99.2	12.6
Eugene Island	Milocene	Louisiana	27.7	15.3
Fariport	Reagan	Kansas	31.8	23.4
Long Beach	Alamitos	California	114.0	20.5
Colgrade	Wilcox	Louisiana	360.0	19.0
Spivey Gradbs	Mississippi	Kansas	26.4	24.5
Elk Hills	Shallow Zone	California	213.0	14.2
Trix-Liz	Woodbine A	Texas	693.8	10.6
St. Teresa	Cypress	Illinois ^⑨	121.7	21.6
Bradford	Devonian	Pennsylvania ^⑩	2.8	9.9
Huntington Beach	south Main Area	California	86.2	16.4
Bartlesville	Bartlesville	Oklahoma	180.0	13.0
Rhodes Pool	Mississippi Chat	Kansas	43.3	30.5
Toborg	—	Texas	153.6	18.0

①路易斯安娜; ②得克萨斯; ③堪萨斯; ④利比亚; ⑤俄克拉荷马; ⑥俄亥俄; ⑦加利福尼亚; ⑧伊利诺伊; ⑨宾夕法尼亚

界面张力是混相性的一种度量标准；界面张力越低，紧挨着的两相就越趋于混相。例如，一旦接近临界点，液相的性质就变得与其汽相的性质无甚差别。于是，在临界点处的界面张力为零。图 2.4 表示在接近 2420 磅 / 英寸² (绝对) (16685 千帕) 的临界压力时；甲烷 / 戊烷体系在 100 ° F (38 ° C) 温度下的界面张力随着压力趋近于临界值而减小的情况^[6]。据观察，低界面张力也存在于甲醇和表面活性剂组成的体系中。据报导，有些配方的界面张力值为 10⁻⁵ 达因 / 厘米 (毫牛 / 米)^[7]。低于 10⁻³ 达因 / 厘米 (毫牛 / 米) 的界面张力称为超低张力。

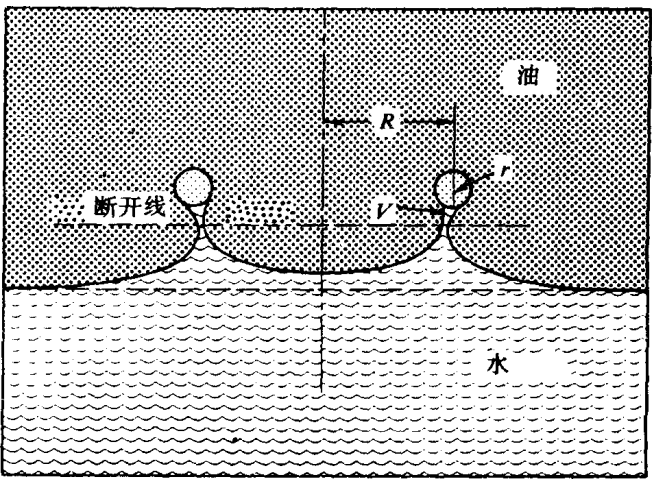


图 2.2 濒临脱开点时界面膜的状态

2.2.2 润湿性

孔隙空间内，储集岩表面与各相流体之间相互作用影响着岩层内流体的分布和渗流特性。当两种不混溶流体相与固体表面接触时，其中一相流体被该表面吸附的程度往往强于另一相流体。这一相流体就是润湿相，而另一相为非润湿相。

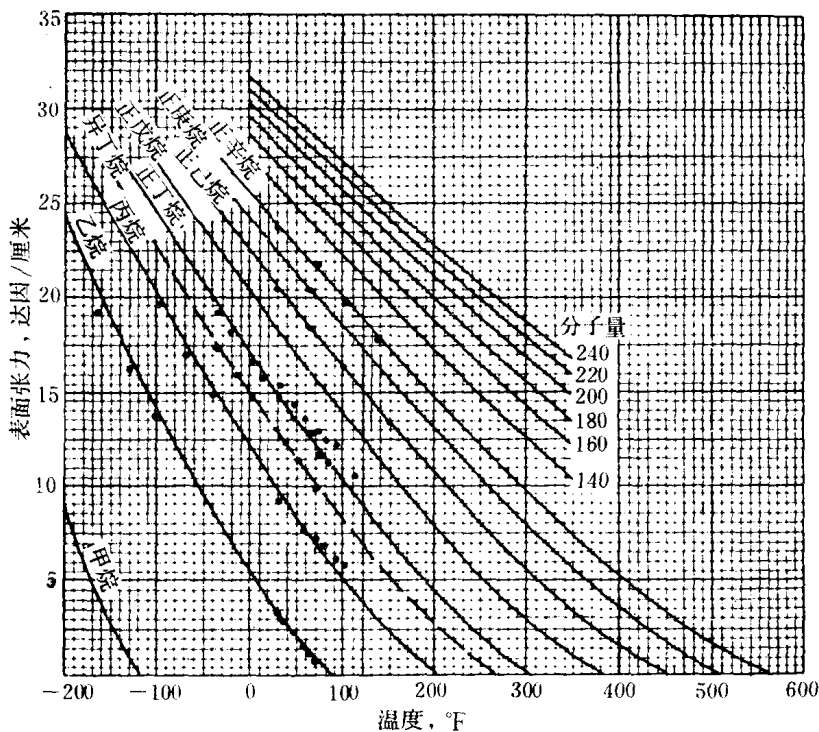


图 2.3 石蜡族烃类的表面张力^[23]

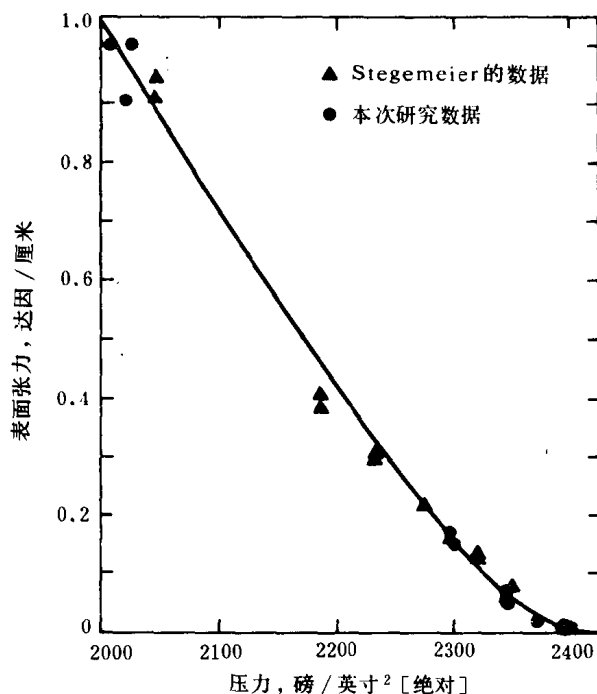


图 2.4 100 ° F (38°C) 时甲烷 / 正-戊烷的界面张力

的接触角接近零。油湿系统的接触角接近 180°。接触角接近 90° 的系统，称为中间润湿性。

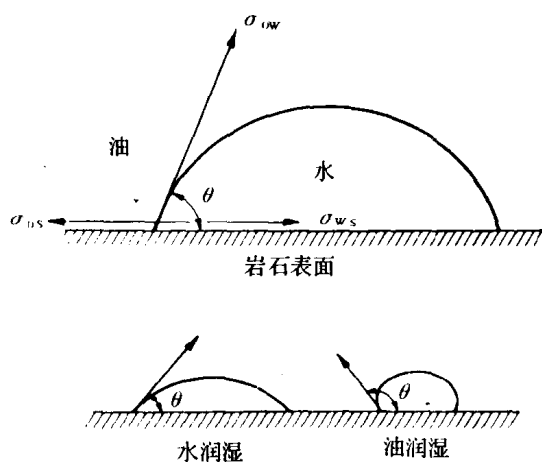


图 2.5 油 / 水 / 固体系统的润湿性⁽⁸⁾

如图 2.5 所示⁽⁸⁾，通过检验两种流体（水和油）与固体相接触线处，这两种非混相流体之间的力的平衡情况，可以定量地解释其润湿性。水相优先于油在整个表面上展开。出现在接触线上的各种力为 σ_{os} （即固体和油相之间的界面张力）， σ_{ws} （固体与水之间的界面张力）以及 σ_{ow} （油和水两相之间的界面张力）。接触角 θ 是从水相量到 σ_{ow} ，即接触线处界面切线的夹角。在处于平衡时，沿该接触线作用的各种力的总和必然等于零。方程式 (2.1) 描述了杨氏 (Young) 公式⁽⁹⁾，表示平行于岩石表面方向上的力的平衡。

$$\sigma_{os} - \sigma_{ws} = \sigma_{ow} \cos\theta \quad (2.1)$$

无论是 σ_{os} 还是 σ_{ws} ，都未曾测定过。结果， θ 的大小成了光滑、均质表面润湿性的主要量度。图 2.6 示出了水湿和油湿体系的实例。⁽¹⁰⁾ 水湿系统的接触角接近零。油湿系统的接触角接近 180°。接触角接近 90° 的系统，称为中间润湿性。

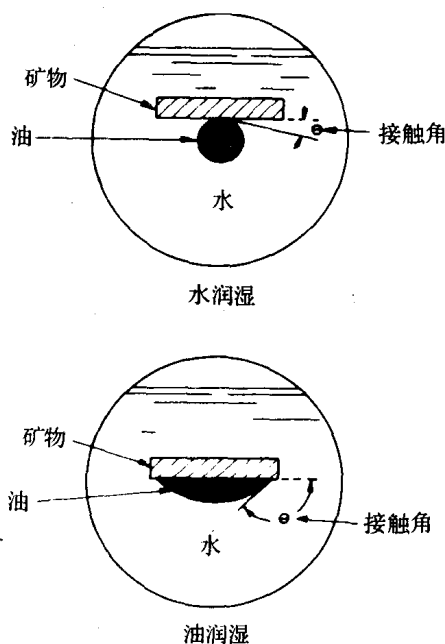


图 2.6 沿水相测定的接触角⁽¹⁰⁾