

美国石油工程师学会专论丛书

油田注水开发工程方法

石油工业出版社

6

美国石油工程师学会专论丛书

油田注水开发工程方法

〔美〕F·F·克雷格

大庆油田科学研究设计院
华东石油学院 张朝琛 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是美国石油工程师学会组织编写的一本专著, 内容介绍了美国砂岩油田注水开发的现场分析方法。全书共十章, 讨论了微观渗流物理, 分析了注入水的驱油效率、油层非均质性和井网等对注入水扫及效率的影响, 介绍了研究纵向非均质性及其数学处理的方法, 以及注入水在油层中的扫及效率, 还列举了有关油层非均质性、注水采收率和生产动态的各种工程分析方法和现场实用方法, 提出了开辟注水试验区的要求。书末附录中介绍了本书所用的渗流力学基础、实用图表和一套实用计算例题。

本书可供油田开发开采工程技术人员参考。

本书第一~三、五~七和九、十各章由大庆油田科学研究设计院翻译, 第四、八两章及附录由华东石油学院张朝琛同志翻译, 全书经张朝琛同志做了校订。

Forrest F. Craig

THE RESERVOIR ENGINEERING ASPECTS OF WATERFLOODING

Society of Petroleum Engineers of AIME

New York 1971 Dallas

美国石油工程师学会专论丛书

油田注水开发工程方法

*

(根据石油化学工业出版社纸型重印)

石油工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

大兴县诸营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $8^{3/8}$ 字数184千字 印数1—1,900

1981年3月北京新1版 1981年3月北京新1版第1次印刷

书号15037·2194 定价0.68元

目 录

第一章 引言	1
第二章 储层岩石内油-水渗流的基本特性	6
2.1 岩石的润湿性	7
2.2 流体分布	13
2.3 毛细管压力	17
2.4 相对渗透率	23
2.5 原始状态和人工复原的岩心	25
2.6 测定油-水渗流特性的方法	28
2.7 三相的相对渗透率	33
2.8 共存水饱和度	34
第三章 水驱油效率	44
3.1 前沿推进理论	44
3.2 水的舌进	55
3.3 粘性指进	56
3.4 共存水的流动度	58
3.5 前沿推进理论的实际应用	58
3.6 岩石润湿性对采油动态的影响	64
3.7 油与水粘度的影响	65
3.8 地层倾角和流速的影响	66
3.9 原始含气饱和度的影响	67
第四章 流度比的概念	79
4.1 流度比概念的发展简况	79
4.2 流度比的定义	80
4.3 人工注水时的流度比范围	82

第五章 面积扫及效率	84
5.1 定义	84
5.2 测定方法	84
5.3 见水时的面积扫及效率	87
5.4 见水后扫及面积增大的情况	95
5.5 各种注水井网的注入能力	95
5.6 预测扫及面积的方法	97
5.7 影响扫及面积的其它因素	104
5.8 影响注水井网选择的因素	109
第六章 储油层的非均质性	120
6.1 储油层非均质性的类型	120
6.2 渗透率分层性的定量表述方法	123
第七章 纵向和体积扫及效率	136
7.1 定义	136
7.2 流度比的影响	137
7.3 重力的影响	141
7.4 毛细管力的影响	144
7.5 层间交渗	145
7.6 注水速度对计算体积扫及效率的影响	146
7.7 层组的选配对计算体积扫及效率的影响	151
第八章 预测注水开发动态的方法	157
8.1 理想完善的预测方法	157
8.2 关于油藏非均质性的预测方法	158
8.3 关于扫及面积的预测方法	163
8.4 关于驱动机理的预测方法	165
8.5 利用数学模型的预测方法	168
8.6 预测注水动态的经验方法	170
8.7 各种预测方法的情况比较	173
8.8 实测和预测动态的比较	180
8.9 推荐采用的注水预测方法	183

8.10 注水预测方法的实际应用	190
8.11 影响注水采油动态的各种因素	191
第九章 注水试验区	201
9.1 试注的优越性与局限性	201
9.2 从注水试验区中可得到的资料	202
9.3 注水试验设计	207
第十章 结论	209
10.1 注水法的现状	209
10.2 当前的问题和需要进一步研究的领域	209
附录 A 分流量方程式的推导	214
附录 B 前沿推进方程式的导出	216
附录 C 韦尔杰方程式的另一种推导方法	219
附录 D 其它一些公开发表的设计图版和相关曲线	220
附录 E 计算示例	226
E.1 计算分流量曲线和驱油动态	226
E.2 计算流度比	228
E.3 计算最终注水采收率	228
E.4 综合水油比-采收率动态	230
E.5 综合注采速度、水油比和采收率随开发时间的变化	232
E.6 个别井的动态	253
符号略表	257

第一章 引言

在美国和加拿大，油田注水在各种人工恢复压力方法中占主要地位，它承担了当前高速采油和提高原油储量采出水平的重任。注水方法所以能得到广泛应用有四方面的原因：

(1)一般都有可供利用的水；(2)注水是相对容易的，因注水井中的水柱本身就具有一定的水压；(3)水在油层中具有扩展的能力；(4)水在驱油方面是有效的。

一般认为，美国第一次注水是在宾夕法尼亚州匹特贺城地区一次意外的注水的结果^[1]。1880年约翰 F. 卡尔断定这些水的通路是经由一个浅砂层进入井底的，中间因为要经过油砂层，所以有助于增加采油量。很多早期的注水都是意外发现的，如由于含水浅砂层的渗漏，或者由于地面水积满已钻好的井筒。当时只觉得注水的主要作用在于维持油层压力，与溶气驱时相比，可使油井的产油期延长。

在最早的人工注水法中，是先从单一井中注水，随着水侵层带的扩增，邻近各井将被水淹，然后再把这些水淹井改为注水井，使水侵地区不断扩张。这就是人所共知的“环状注水”^[1]。福雷斯特石油公司^[2]把这一方法改成在一连串的井中同时注水，形成了一种线性水驱。第一个五点注水井网是1924年^[3]在布雷德福特油田南部试用的。

布雷德福特油田有相当大的产油面积，只有少量的溶解气，而且没有遭受天然水侵。这些因素都促使该油田的人工注水迅速发展。到1931年开始在俄克拉荷马州诺瓦塔郡的

巴特利兹维尔浅油砂层中注水，不到几年功夫很多巴特利兹维尔砂质油藏就都纷纷仿效而进行注水。得克萨斯州的第一次注水是1936年在布朗郡的“油煎肉”矿区开始的。将近十年以内，该州绝大部分采油区已实行注水。无论如何，并不是到50年代早期才公认人工注水是一种通用的方法。

规划和实施人工注水一般是由两个基层机构分工负责的，一部分划归油田开发工程，而另一部分工作则属于采油工程。

油田开发工主要是承担有关预测采油动态等各方面的工作。它担负着积累所关心的油藏的一切必要的基础资料。经常是与地质或油藏评价部门一起，准备油藏的构造、等厚及等压图等，并收集岩心分析及流体性质方面的资料，以及专项的测井成果和各种油层压力传递方面的研究。开发工程方面可以要求实验室进行专项的测定工作，例如，进行相渗透率或毛细管压力曲线等试验。利用上述资料，就可以探索各种不同注水井网的优劣，选择注水井的井位，估算注水井吸水能力，以及建议应该补打多少开发井等。开发工程的最终成果是对人工注水的采油动态作出详尽的预测，为注水的规划提供依据。

采油工程往往被称为“执行”组，它与开发工程协同工作，在施工管理方面发挥专长。其任务一般包括水源的选择及水质实验，水处理设备的选型及设计，制订测试和计量装备的使用规范，研究腐蚀或结垢的动向，检查现有的生产井以确定要做那些修井工作等。

在一个注水规划实施以后，无论开发工程或执行部门的工程就分担起责任。前一部门的人员就要继续观测油藏动态，预测及调整动态变化。后一部门则忙于经营管理地面注采设

备。油、水井的修理则由两个部门共同计划。

以上介绍开发工程和采油工程即执行部门的业务分工是过于简单的。每个工程部门都有自己的职责范围，但是他们的共同努力，却是一个成功的注水工程必不可少的。

本书仅论述在注水方面的油田开发工程问题，简单地说，就是要定量地理解水是如何从油藏岩石中驱油的问题，其中包括预测注水速度、采油速度、生产水、油比以及今后各个时期的累积采油量。

油田开发工程是为数很少的一项应用科学，它所涉及的，从整体来说是一个看不见、摸不着，既不能称量，又不能计量，也不能试验的系统，即使在整個油田的每口井都取心，人能看到的样品也不到整个油藏体积的百万分之一。取出地下的流体样品进行实验室测定，也都受到类似的条件限制。

虽然取出的油藏岩样是有限的，但是为了得到更详细的油藏资料，各种判断和解释技术都有所发展。比较经济的是各种测井技术，经常可以用在钻完了好几年的井中，通过测试可获得岩石的孔隙度、渗透率、饱和度及岩相变化等资料。这些测井方法都是设法测出其半径比井筒大几倍的井底附近地层范围内，地层对电、声和放射性的响应情况。各井的压力传递实验及其解释^[4]，则对测定油层整体方面的物性提供了很有用的工具。当前的新进展是采用所谓的地质工程方法，它把从取岩心、测井和岩屑录井所得到的资料，用统计法进行综合，从而可得到油藏渗透性变化的详细描述^[5]。这一方法若用于砂岩层，是相当有前途的。砂层一般都是层次分明的，这些地层在相当大的区域内是同时沉积的，在沉积过程中就存在着孔隙性。碳酸岩层的孔隙性则是在沉积后靠地层水的运动和白云岩化而发育的，所以碳酸岩层的岩性往往

呈极不规则的变化。在此类岩层中，从各井中测出资料来推断各井之间的地层物性一般来讲是不大可靠的。

可以这样说，我们目前能满意地对油藏动态进行模拟，而还无法满意地描述油藏本身。当前我们所掌握的有关驱油机理的知识和我们所拥有的计算采油动态的各种方法，尽管在每个细节上还不够完善，但已超过了我们对油藏内流体饱和度及岩石性质在空间上的变化的描述能力。无论如何，尽管目前还不完善，但油田开发工程确实仍然是一门科学。

本书的一个目的，就是对油田开发工程在注水方面使用资料的方法作一个浅显的介绍和评述。本书是为了帮助现场工程人员进修这一领域的知识，同时也可以作为一本参考书。详细的数学推导及计算实例则放在附录中，所以本书仅着重于利用这些方程式以求对人工注水有一个定量的理解。

本书包括了在计量和计算方面各具特色的各种不同的方法，但只挑一个比较全面可取的方法重点介绍，同时解释其可取之处。其它一些可供选择的方法也将予以讨论，有的可能谈得仔细些。尤其是预测注水动态的方法，现在更是千变万化花样很多。当然，对每一类主要的方法有明显改变之处将讨论得细一些。对现场的开发工程人员来说将可选用一个方法，而对于研究人员则将引领他们去掌握其它可供选用的方法。

本书在开篇中从注水的基础谈到采油方法在工程上的应用。紧接着的一章讨论储层岩石中油、水渗流的基本特性以及影响渗流特性的各种因素。对于有关油藏取样的问题也作了相当的评述。第三章介绍如何从基本流动性质出发去计算驱油效率。随后各章则讨论流度比概念和说明在不同的注采井网下流度比对平面侵及效率的影响。接着又概括地讨论油

藏非均质性的几种类型，而着重在渗透率垂向变化的研究方法。以此为一个序曲，然后就介绍各种影响垂向侵及效率的因素。在讨论驱油效率及平面和纵向的侵及效率时，就合乎逻辑地需要介绍各种预测注水采油动态的方法，特别强调这些方法所需要的资料。讨论了这些方法的使用范围与局限性，作为对这些方法的一种评价手段，是把这些方法与应当力争达到的“理想完善”的预测方法进行比较。第九章谈及试注区动态的解释。最后一章分析注水工艺当前的水平，同时也谈到还要进一步进行研究的领域。

详尽的数学推导放在各个附录中。附录中还包括在预测注水动态时用得上的设计图表及各种对比关系。为了说明这些方程的应用，在最后的附录中列举了一系列问题的计算实例。

参 考 文 献

1. *History of Petroleum Engineering*, API, Dallas, Tex. (1961).
2. Carll, John F.: *The Geology of the Oil Regions of Warren, Venango, Clarion, and Butler Counties, Pennsylvania*, Second Geological Survey of Pennsylvania (1880) III, 1875-1879.
3. Fettke, C. R.: "Bradford Oil Field, Pennsylvania and New York", Pennsylvania Geological Survey, 4th Series (1938) M-21.
4. Matthews, C. S. and Russell, D.G.: *Pressure Buildup and Flow Tests in Wells*, Monograph Series, Society of Petroleum Engineers, Dallas, Tex. (1967) 1.
5. Alpay, O.: "A Study of Physical and Textural Heterogeneity in Sedimentary Rocks", PhD dissertation, Purdue U., Lafayette, Ind. (June, 1963).

第二章 储层岩石内油-水渗流的基本特性

要理解油田注水动态首先应该有储层岩石基本特性方面的知识。储层岩石的基本特性主要包括两个方面：(1) 岩石的骨架性质，如孔隙度、渗透率、孔隙大小分布及表面积；(2) 流体-岩石的综合特性，如毛细管压力（静态）特征及相渗透率（动态）特征。

书中有关常用的岩石物性术语的基本定义如下述：

绝对渗透率——岩石完全饱和某一种流体时的渗透率。

有效渗透率——当岩石只是部分饱和着某种流体时，岩石对这种流体的渗透率。

相对渗透率——有效渗透率与某些基础数值之比。

孔隙率——连通的孔隙占岩石总体积的百分数。

还要谈一下，岩石骨架的基本特性。渗透率和孔隙度的定义及其在工程上常用的测定方法，都是由马斯凯特^[1]、皮尔逊^[2]及柯亨^[3]等人予以解决的。其它一些岩石性质，如孔隙大小分布及表面积在文献中曾有所论及。文献[4~6]中还作出孔隙大小分布与渗透率和相渗透率的对比关系。虽然这些对比关系可以帮助了解微观渗流动态，但它们有很大的局限性，故实际上在油田开发工程中很少应用。

上面提到的油层岩石含多相流体时的静态和渗流特性与各相在岩石孔道内的微观分布有关。各相的分布则受岩石润湿性的控制——也就是岩石表面为各种流体优先润湿的程

度。所以，润湿性和流体分布是比较重要的，本章首先对它进行讨论。

2.1 岩石的润湿性

润湿性是一个广泛应用的术语，其定义为：当存在其它非混相流体时，某种流体延展或附着到固体表面的倾向性。把这一术语用于油田工程，那么，固体就是指的储层岩石（常指碎屑或胶结物或二者都在内），如砂岩、石灰岩或白云岩。在注水情况下，岩石孔隙空间存在的流体有油、水及气体。在有气体存在的情况下，液体将优先润湿岩石表面^[7]，在注入水可能遇到的储层岩石范围内，则仅有油和水被认为是可能润湿相。注水过程中，水或油对岩石优先润湿的能力，在渗流特性方面的影响将在第二章第四节中讨论。

评价储层岩石的润湿性问题，在文献[8]中已有详尽讨论。首先让我们来考察一个理想的典型的水-油-固体系统，如图2-1所示。此种系统的表面能可用杨-裘比^[9]公式表示如下：

$$\sigma_{os} - \sigma_{ws} = \sigma_{ow} \cos \theta_c \quad (2-1)$$

式中 σ_{os} ——油和固体间的界面能，达因/厘米；

σ_{ws} ——水和固体间的界面能，达因/厘米；

σ_{ow} ——油和水间的界面能，达因/厘米；

θ_c ——在油-水-固体界面上沿水相测算的夹角（度）。

油-固体或水-固体的界面能都无法直接测得。然而，与它们等值的一项，即油、水的界面张力及接触角则可以分别在室内确定。

接触角 θ_c 作为润湿性的量度指标是显而易见的。如图2-1所示，接触角的变化范围可以从 0° 到 180° 。沿水相测出

的接触角若小于 90° 时，则表明是优先水湿的情况，如接触角大于 90° 则为优先油湿。接触角为 90° 时，则说明岩石表面对油及水的选择性润湿情况相同。

润湿性已有定性的比较。技术文献中常用“强水湿”、“强油湿”或“中间润湿性”等术语来表示，这些定性的术语所对应的定量范围则是很少有说明的。无论如何，下述的大致范围有时还是可以用的。

接触角如接近于 0° 和 180° ，可以分别认为是强水湿及强油湿。接触角在 90° 附近则是中等程度的选择性润湿，它归属在“中间润湿性”这一术语的范围内。

在油田开发工程的发展初期，一般认为所有的油层都是优先水湿的。产生这一看法似乎是很自然的，因为都认为砂岩油藏是在含水的环境内沉积的，只是到后来石油才运移到这些砂岩层中去。同样，很多沉积岩矿按其天然形态来说是水湿的。在碳酸岩地层中，水在孔隙的发育过程中占有很大的份量，而油仍是迟到者。但是在 1934 年纳丁就确认，某些油层是油湿的^[10]。

大量的实验室实验已可得出结论，那就是油藏的润湿性按其本质来说是取决于原油内是否存在着少量的极性组分^[11,12]。这些极性组分，按其性质看来是沥青属的，会吸附在岩石表面，而使表面成为油湿。这些极性组分的影响，在某种程度上又取决于天然岩石表面的性质——也就是说岩石的表面是石英还是碳酸盐或粘土占主要地位。邓内卡斯等^[13]在原油组分对岩石润湿性的影响方面作了详细的研究。

在某些油层中，沥青质的吸附程度是如此的强烈，以致用常规的岩心清洗步骤都无法将其去掉。属于此类地层的例如怀俄明州的廷斯勒普砂岩及宾夕法尼亚州的布雷德福特

砂岩。

测定储层岩石润湿性已经有好几种方法，现将主要的测定方法予以讨论。

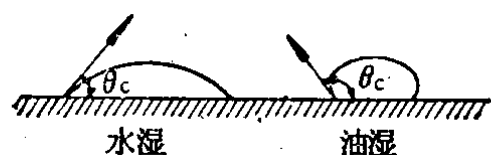
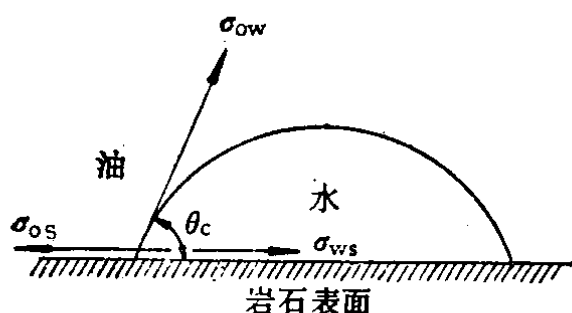


图 2-1 油-水-固体系统的润湿性^[8]

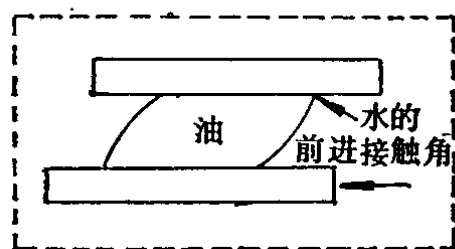
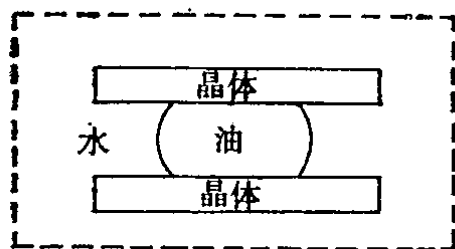


图 2-2 接触角的度量

接触角的度量

为了用接触角测定法取得一个有代表性而且真实的岩石润湿性，首先需要取一个未被污染的地下原油样品，还要知道储层岩石表面的组成。此外，也要有油藏的水样，若无适用的地层水时，可对其矿物含量予以模拟。接触角的测定，基本上就是确定原油中是否会有能使储层岩石变为油湿的表面活性物质。

文献[14]已经介绍了接触角测定仪及其实验的基本程序。将一个扁平的且表面经过磨光的岩矿晶体，浸入到地层水中，然后把一滴地层油注到该固体表面上。图 2-2 表明一个油滴是如何悬挂在两个晶体表面之间。错动这两片晶体板，水就会挺进到先前为油所覆盖的表面部分。在晶面上刚为水而让

出的表面处，其接触角称为水的前进接触角，它的大小是岩石表面曾与油接触时间的函数。图2-3是这类测定结果的一个典型曲线图，从图中可以看出，在达到某一个平衡值以前，接

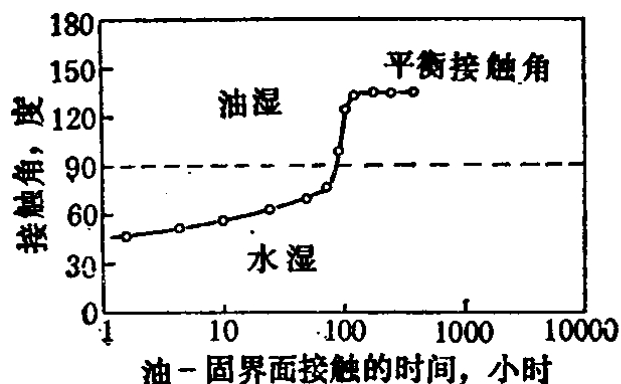


图 2-3 趋于平衡的接触角

触角一直随油-固体界面接触时间而增加。一般达到平衡需要几百甚至几千个小时。图2-3表明，初期的测定值都说明是优先水湿，在将达到平衡时，这一表面却成为油湿的了。

优点是结果可靠，因为取得一个未被污染的地层油样，总比取一个未被污染的储层岩样，相对来讲要容易些。该法的缺点主要是测定时间冗长，而且需要一个无尘的和惰性的试验系统。

岩样的吸吮-驱替试验

用储层岩样在实验室进行驱替和吸吮实验的方法有好几种型式。一般说来，这些试验所用的岩样，从岩样的取得、运输及储存，都是按着保存其原始润湿性的路子走的。为了使岩心的润湿性不会改变，在取心和处理岩心时应该注意的要求，将在第二章第三节中讨论。

用岩样来评价储层润湿性的实验，一般要用精制油和实验室配制的盐水。一个疑问是，既然那些引起优先润湿的流体已经脱除，那么这些实验从哪一点上说仍能代表储层的润湿性。事实上，这些实验还是有用的。从图2-3看出，储层的润湿性需要成百上千个小时的老化接触时间，才能使吸附

达到平衡。同理，要用渗流驱洗的方法把这些影响润湿性的物质脱除下来，也需要经过相应的时期。所以，用精制油和室内配制的盐水迅速进行实验，就其所需的时间来说，岩样的优先润湿性是可以保持下来，而不致有所改变。当然，如果在取心过程中与钻井泥浆内所含的表面活性物质接触，或者是用加热等程序把岩心进行全面彻底的清洗，那么原有的优先润湿性就可能遭到破坏。

博贝克等人^[15]提出了一种室内确定润湿性的方法。该法是要确定，哪一种流体能靠吸吮作用从岩样中把另一种流体驱替出来。把这种吸吮实验的结果，与把同样岩心在 400°F 下加热 24 小时去掉各种有机物以后所作出的参考性吸吮实验进行比较。然后把这两个实验的相对吸吮速度和吸吮量作为一种辅助的定性的润湿指标。

在同一篇文章中还讨论了估算非胶结物质润湿性的方法。该法特别有价值的是它可以在井场就地试验。把一薄层的非胶结油砂样摊放在显微镜的载物片上，滴入洁净的精制油使油砂的含油量增加，然后向砂粒表面滴水，观察砂样中流体的运动情况。倘若砂岩是亲水的，滴入的水将从砂粒表面驱油，驱出的油呈球状，这就意味着油是一种非润湿相。用类似程序可以试验出砂层是否亲油。

阿莫特^[16]提出一个综合的吸吮-驱替作用试验方法。将储层岩样用水冲刷到只剩下残余油饱和度，再抽空去掉岩样内的气体，其主要程序如下：

1. 将岩心浸入油中(例如煤油)，浸泡 20 小时以后，测出吸油而驱出的水量；
2. 将泡在煤油中的岩心用离心法甩水，测定驱出水的总量；