

● 陈永生 著

油藏流场



石油工业出版社

京)

内 容 提 要

本书主要研究油藏流场及其非均质特点,注水油田开发后期的油层变化,以及流场中流体的分布特点和变化。本书系统地论述了油田注水开发及流场的变化规律,不同层次流场非均质的发展变化,及其在油田开发过程中的运动规律。这些特点及其变化对油田注水开发的影响,同时还研究了压力、温度、断层、裂缝及水的性质对流场及流体的影响。

本书适合从事油田开发的研究人员和工程技术人员以及大专院校师生学习参考。

DP-9 1/1

图书在版编目 (CIP) 数据

油藏流场/陈永生著.

北京:石油工业出版社,1998.10

ISBN 7-5021-2323-7

I. 油…

II. 陈…

III. 油藏—流场 (流体力学)

IV. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 17139 号

石油工业出版社出版

(100011 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 11½ 印张 276 千字 印 1—1000

1998 年 10 月北京第 1 版 1998 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2323-7/TE·1937

平装定价: 27.00 元

自 序

油田投入开发之后，油层中的流体处于不停的运动和变化之中。除此之外，油层发不发生变化呢？多年的研究都假定油层，也可理解为流场是不变的，流场非均质所造成的差异和矛盾的相对关系也是稳定的，各种孔隙、物性参数及其相互关系也是不变的。大庆油田注水开发 30 多年来，录取了极其丰富的资料，并进行艰苦的室内实验工作，大量的分析研究证明流场自身是变化的，非均质所造成的种种矛盾关系是发展变化的，流场的各种参数也是变化的，而且有一定的规律。改革开放以来，当我们研究国内其它油田的资料和国外的一些成果时，也发现了类似的情况。所以，有必要建立一门新的边缘科学——油藏流场学。它不但研究油层物理，而且应用沉积岩石学、构造地层学、晶体表面物理、水动力学、物理化学等学科的成果，研究油层孔隙及流场物理的空间分布规律，它们之间的相互关系，以及油田开发后的种种变化。

在种种已经商品化的数学模拟中，用的最普遍的、最基本的方程式之一，是状态方程式，在模拟油田开发过程中，认为这个方程式是不变的。在很多室内试验中，由于表达方式，相似条件等种种原因，也得出状态不变的结论。但在目前掌握的资料中，有非常丰富的资料与数据证明，长期注水之后，流场变了，非均质差异程度变了，流场物性变了。

从基本道理研究结果说明，不同的开采方式，流场变化的主要特点是不同的。

这一切都是流场学研究的内容，它最主要的资料来源是大庆许许多多技术人员，研究人员和广大的干部、工人辛勤劳动得来的。我只不过综合分析了一下，顺了一下，并写了出来。这门边缘学科能够诞生，应该感谢他们。

本书主要叙述了注水开发油田的规律，不同驱替剂开发的油田，各自有一些不同的特点和特殊的规律，希望在不久的将来有机会拜读到这方面的论著。

谢谢！

陈永生

一九九八年六月于大庆

前 言

流场是石油和天然气的储集空间和运移通道，油气水及其它流体在其中流动，除空隙之外，裂缝，洞穴也可能成为流场。本书主要讨论的是孔隙。

组成流场的细胞是孔隙，所以研究流场首先是从孔隙研究开始。孔隙有大小、多少之差别，孔隙间由喉道连结。孔隙的表面，也就是造岩矿物的表面，由于造岩矿物的不同，其表面负电场不同，加上与孔隙中粘土矿物流体的复杂关系，构成了油层复杂的润湿性，对油田开发效果产生了深刻的影响。

每个孔隙空间，在不同方向上通过喉道与其它孔隙连通，连通空隙的多少，就是常说的配位数。不同的空隙，配位数不同，就构成了复杂的孔间关系，加上毛管力的作用，直接影响了孔隙利用状况。

如果将孔隙—喉道—孔隙……连接起来，简化来说，有人提出迂曲度，这是一个不大严格的简化。由于毛管力复杂情况的作用、贾敏效应、自吸现象在同一岩心上，都得到表现，这因为不同的孔隙，润湿性不同。

孔隙存储着的流体，不但在运动状态下受力，而且在静止条件下也受力，这既有表面张力，也有矿物颗粒表面的电场力。在力的作用下孔隙中液体可能有三种受力状态：束缚态、半束缚态和自由态。

不同孔径的孔隙以一定的规律组合之后，就形成了沉积砂岩的结构构造，如层理、交错层等。如果油层纵向上出现这种变化，在沉积岩石学中称为韵律，形成了油层层内纵向非均质。

当由无数孔隙组成的油层，在横向孔径发生变化、油层厚度发生变化、甚至被不渗透边界所包围时，就形成了油层平面非均质和独立的渗透单元。

油田开发时，由于经济的原因，一般一口井不可能只射开一个层，于是出现了层间非均质。在这些层组合在一起，同井注水、采油的情况下，就产生了层间矛盾。

孔隙—孔隙的组合及分布，构成了复杂的非均质状态。作者将它分为流场的6个非均质渗透层次：表面非均质、孔道非均质、孔间非均质、层内非均质、平面非均质和层间非均质。

需要特别说明的一点是渗透率问题。油田开发技术的发展赋予渗透率极其复杂的内容。不同岩心渗透率不同，这是常规的认识。同一岩心不同方向测出的空气渗透率不同，于是就有垂直渗透率、水平渗透率、方向渗透率的提出。同一岩心，同方向用不同的流体测试，测出的渗透率也有明显的区别。于是提出流体渗透率，相渗透率，…。在油层束缚水的条件下，对油相的渗透率被称为有效渗透率，而注水时，用相对渗透率曲线分析，应该无水相渗透率，实际上水却都注进去了，于是就提出了注水渗透率。开发注水两过程，在油层中可能出现两相，甚至三相流动，于是就有了相对渗透率。为什么渗流能力有这么多样的变化呢？在对流场进行研究之后，应该可以得到初步的认识。

流场及其中存储的流体，处于一定的压力、温度场下，在初始状态下，温度是有规律可循的，而且固体与流体是一致的。压力却不同，有垂直岩压、水平挤压力和流体压力之分。

可以说压力主要影响了孔隙的大小，而温度主要影响流体的状态。

油田投入开发之后，尤其在用水或其它驱替剂开发之后，首先碰到的问题是原油或驱替剂之间性质的差异，我们把它称为流体非均质。这种非均质将影响油田开发的始终。而且开发过程不仅影响压力场、温度场的原始平衡状态，还将引起后来的一系列变化。

注水（或其它驱替剂）开发之后，油层孔隙、孔隙度、渗透率、润湿性、岩石力学性质等方面，都发生了明显的变化。加上流体非均质性的影响，使各方面非均质程度提高，各种矛盾加剧。我国大量油田开发实践和室内、现场实验均证明了这一点，这种变化明显地影响了开发效果，但这些现象和成果还没有引起人们足够的注意。

作为流场，除了孔隙之外，还有裂缝和洞隙，由于它们的影响，使流场的渗流过程变得更加复杂。

作者在书中对上述问题均做了讨论，并提出一系列看法，希望能引起同行对这些问题的兴趣。

INTRODUCTION

The flow field is the oil and natural gas's reservoir space and migration pathway, in which oil, gas, water and other fluids can flow. Except pores, fractures and caves also can be the flow field. In this book the emphasis will be placed on the pores.

We first set about studying the pores that consist of the basic units of the fluid field, The sizes and number of the pore cover a very large range and the pores are linked with throats. The diversity of rock minerals on the surface of the pores causes the different kinds of surface negative electric field. In addition, the relation between the surface of the pores and the clay minerals' fluids of the pores surface results in the complex wettability of oil - bearing formations and exerts a very deep influence on the efficiency of the oil field's development.

Each pore's space is linked with others in different directions through the throats. The number of connected pores is usually called ligancy. Different pores have different ligancy together with the capillary force effect the pore's usage conditions directly.

The concept of the tortuosity factor mentioned by some people is not so accurate because it has simplified the connection between pores, throats and other pores. With the effect of capillary force, Jamin effect and self - suck phenomenon all perform on the same core just because of the various pores' different wettability.

The fluids hold in pores bear both surface tension and electric field force on the surface of the mineral particles, either under flow regime or under motionless regime. The fluid in the pores possibly has three states under the effects of forces: the restricted, half - restricted and free state.

The pores with various sizes combine with each other under certain rule and thus from different depositional sand textures, such as stratification, crossed bedding etc. If this phenomenon happens vertically in oil - bearing formations which is called rhyme on sedimentography, the vertical heterogeneous reservoir will be formed.

When the lateral apertures and the thickness of formation change in oil formations and the oil formations are surrounded by non - permeable boundary, the planiform heterogeneity of oil formation and the independent permeable units will come into being.

During the period of oil field development, due to the economical factor, it is impossible to shoot only one formation for one well. Thus the heterogeneity between formations will occurrence. The contradiction among formations will be produced when the water flooding and oil production is performed at the same time for these formations' combination.

The pores and the combination and distribution of pores result in complex heterogeneity. The author divides them into six heterogeneous permeable stratotypes of the fluid field: surface heterogeneity, passage heterogeneity, pores' heterogeneity, interlayer heterogeneity, planiform heterogeneity and internal heterogeneity.

Here the permeability should be illustrated especially. The progress of oil field developed technology has added up very complicated connotation to the permeability. Normally, different cores have various permeabilities. The vertical permeability, the lateral permeability and the directional permeability have been mentioned because the air permeabilities measured are various according to the different directions for the same core. Even through the core and testing direction keep unchangeable, the tested permeability will change apparently because of the fluid's difference, so the fluid permeability, phase permeability etc. are set forth. While the oil formation contains restricted water, the permeability of oil comparing to air is called effective permeability. During the period of water's injection there will be no water phase permeability on the base of the relative permeability curve's analysis, but the water has already been injected into the formation, so the injection water permeability is will be set forth. During the period of development, there may be two phases, or even three phases in the oil formation, so the comparing permeability becomes necessary. Why does the ability of filtering change so various? The basic knowledge can be acquired after we fished the research of the fluid field.

The fluid field and the fluids stored in it are under certain pressure and temperature fields; in the original state, the temperature follows certain law and the solid and the fluid are agreeable. But the diversity of the pressure gives the birth of vertical rock pressure, lateral squeeze force and fluid pressure. We can say the pressure mainly affects the states of fluids.

After the oil field is put into developing, especially after the water and other driving liquids, the first met problem is quality's differences of the crude oil or the driving liquids. We call this the fluid heterogeneity which will not only influence the development of the oil field from the beginning to the end but also affect the pressure field's and temperature field's original equilibrium state in the period of the development and cause a series of variations later.

After the water and other driving liquids are put into development, the pores of the oil formation, the porosity, the permeability, the wettability and the rock mechanical qualities etc. all will change apparently. If the fluid heterogeneous effect is accounted, the degree of heterogeneity of different parameters will be increased as well. The practice of oil field development, the experiments on the sites and in the laboratories in our country have proved this conclusion. The parameters' change apparently affects the efficiency of developing, but this phenomenon and the conclusion has not caught the enough attention of the persons who work in the oil - field development in the world.

The fluid field that includes not only pores but also fractures and caving must influence make the process more complicated than ever.

The author hope that the discussion and the opinions talked above can inspire the scholar's interesting.

目 录

第一章 流场	(1)
第二章 油层孔隙	(4)
§ 1 孔隙与孔隙度	(4)
§ 2 孔隙非均质在油田开发过程的表现	(15)
§ 3 注水后油层孔隙的变化	(26)
第三章 渗透率	(38)
§ 1 油层渗透率特点	(38)
§ 2 流体渗透率	(44)
第四章 油层润湿性	(52)
§ 1 油层润湿性	(52)
§ 2 油层孔隙中油水分布的力学模式	(61)
第五章 流 体	(66)
§ 1 原油物理性质及其对油田开发的影响	(66)
§ 2 原油组分非均质	(71)
§ 3 注入水对原油性质的影响	(77)
第六章 断层与裂缝	(83)
§ 1 断层	(83)
§ 2 裂缝	(87)
§ 3 水力压裂裂缝	(96)
第七章 油层结构	(104)
第八章 厚层非均质	(111)
§ 1 不具底水的厚油层	(111)
§ 2 具底水 (或气顶) 的厚油层	(127)
第九章 平面非均质	(129)
§ 1 油层平面非均质特点	(129)
§ 2 平面非均质的动态特点	(131)
第十章 层间非均质	(142)
§ 1 层间非均质的地质特点	(142)
§ 2 层间非均质的动态特点	(143)
第十一章 剩余油分布的基本特点	(165)

第一章 流 场

石油是极其宝贵的资源，是现代文明的支柱资源。随着科学技术的发展，对它的需要量将越来越多。但是石油又是有限的资源，不可再生的资源，在地球上消耗一吨，就少一吨的资源。这样的基本态势就决定了两个基本事实：一是怎样在经济有效的条件下，充分地采出地下资源，科学地利用，给人类提供最大的利益；二是开发其它能源，制定科学合理的能源政策。我们研究的流场问题就是解决第一个问题的基础。

几十年的油田开发实践和科学技术的飞快发展，提出一个新课题，需要发展一门边缘科学——流场学。油层物理已经远远不能满足现代油田开发的需要了。我们把流体的存储空间和流动通道称为流场。流场由无数的孔隙、裂缝组成，很少数的情况，洞穴也可以成为流场，在极特殊的情况下，在开发的过程中，断层也会成为流体流动的通道，但我们并不把它看做是流场，因为它仅仅是流动通道。

组成流场的最小单元，也可以理解为细胞，是孔隙，由喉道（可以看做孔隙的变细部分）将无数的孔隙连通起来，构成了极其复杂的空间孔隙网络，这是流场的基本特点，所以说讨论流场时，不仅包括孔隙，还包括使孔隙连通起来的喉道。喉道除了可以作为孔隙连通的通道之外，还是存储流体的空间。只要有裂缝存在，在很多情况下，裂缝也多是通道，而且往往是主要通道。

造岩矿物是组成流场的框架，多数油层是沉积成因的，只有很少的储集层是火成岩或变质岩。造岩矿物的组分、粒径，以及它们的组合，就构成了孔隙大小、形状的空间分布的统计规律，如沉积岩的微细结构、构造、正韵律、反韵律等等。这些特点主要是受沉积成因、沉积环境的控制。对于成岩后生作用明显的油层，后生作用的影响亦是极其重要的甚至是起主要作用的。

粘土矿物也是流场中不可忽视的起重要作用的因素。粘土矿物的种类、产状、分布特点，对流场的特点有着重要的影响，特别是水驱之后的变化，或采取什么样的工艺措施，影响就显得更突出，所以也是需要认真分析研究的。这些问题是属于沉积岩石学的内容，是油层物理包容不了的内容，但又是油田开发必须研究的内容。

流场在空间上的延伸不是无限的，而是有限的，有边界的；不是开放的，而是封闭的，它可以是不渗透地层（或断层）封闭，也可以是水力学封闭，砂岩油层是上述两种封闭条件的综合。对于这种在空间上有一定分布范围，封闭的独立的流场可以称为封闭流场体，简称为封闭体，现在人们常说的油砂体就是一种封闭体。同一沉积年代的油砂体，即封闭体的组合，就是油层。一个油层可以是一个封闭体，也可以由多个封闭体组成。

由于经济、技术的原因，一口井往往开发的不是一个层，而是多个油层（封闭体）的组合。这样原来互不连通的油层（封闭体），通过注水井、采油井就连通起来了，这样就形成了油田开发过程中层与层之间的关系。这些内容虽然与油层物理有关，但却远远地超出了油层物理的范畴。

除研究孔隙之外，还需要研究渗透率，也就是流场的可流动孔隙的截面积。近代发展了方向渗透率和垂直渗透率的概念，在空气渗透率、有效渗透率和相对渗透率的基础上，又提

出流体渗透率这一新概念。孔隙分类的概念，渗透率的概念都得到深化，远远地超出油层物理最基本的概念。

流场内存储有流体，不同的流体在孔隙内是以什么状态存在、受力状况和它们的物理化学性质等问题，在油田开采过程中它们将要发生什么样的变化，也是需要研究的新课题。

流场的表面，也就是造岩矿物颗粒表面，除润湿性之外，还有什么物理化学性质呢？不同的造岩矿物表面有什么差异，油田开发之后的变化等都是需要进行深入研究的问题。

所以，描述流场的最基本内容，应该包括孔隙、孔隙间关系、孔隙流动截面积（渗透率）；孔隙表面、裂缝与断层、孔隙中的流体饱和度；纵向上、平面上孔隙的组合分布特点，封闭流场体、油层、及其与其它油层间的关系。

上述这些流场的原始状况，只是些基本状况，而更重要的是在注水开发之后，所发生的极其复杂的相互间的关系运动、发展、变化。石油这种极其宝贵的资源有部分被采出了，还有一些没有被采出来，而存在地下。在油田开发的全过程，用什么样的方法，花得钱最少，采出的油最多，经济效益最高，这只有对流场进行充分的研究后才能得出最佳的结论。

对于流场，注水开发是一种变化规律，注气开发、热采等工艺，虽然基本原理相同，但却有不同表现特点，并且具有一些不同开发方式导致流场变化的不同的特点，当采用化学驱时，情况就更复杂了。

油田开发是一项巨大的工程，流场研究是搞好这项巨大工程的基础。流场具有什么样的基本特点呢？

第一是流场的非均质性。孔隙表面不同部分是非均质的；孔道是非均质的；不同孔隙间关系也是非均质的；流场纵向上、横向上都有明显的变化，也是非均质的；层与层之间也是非均质的。从微观到宏观就构成了流场的6个非均质层次，即表面非均质、孔道非均质、孔间非均质、层内非均质、平面非均质和层间非均质。

存储在流场内的流体也是非均质的，不同空间位置，分布着不同成分的流体，而且他们的受力状况不同，在油田开发过程中，驱替液和被驱替流体之间也是不均匀的，性质差异是明显的。流场非均质加上流体非均质，构成了油田开发过程中，流场极其复杂的变化情况。若加上温度、压力的变化，断层、裂缝、溶洞等影响，就构成了绚丽多彩的流场世界。

第二是流场中流体的不完全可驱动性。流场充满了流体，在油田开发过程，由于流场的复杂形态和部分流体受吸附力、毛管力的作用，造就在水驱过程，有部分流体是驱不动的。但要注意，不同的驱替剂，不同的工作条件，可驱动的油的量的多少是不同的，但总有部分流体是驱不动的。可驱动的流体越多，自然就会获得较高的采收率。

第三是流场的可变性。油田开发过程，除了流场内的流体运动、变化之外，流场也发生剧烈的变化。比如最简单的弹性开采，随着采出油量、气量的增加，地层压力下降，油层孔隙变小。一方面油层被压缩，如果油层埋藏足够浅，足够厚的话，势必引起地面下沉；另一方面由于孔隙及喉道变小，渗透率降低，造成采收率降低，对于含水饱和度高的油层，甚至会出现不出水的油（气）井含水的现象。至于用注水、注气、注聚合物、注三元体系，热采等开采方式开发油田，流场要发生更为激烈的变化。注入的流体打破了原来流场与流体之间热力学、物理化学等的平衡关系，重新建立新的平衡，这个新平衡的建立过程就是流场的变化过程。不同的驱替剂和工作条件，这个过程是不同的，水、气、三元体系热力，对于流场作用虽有共通点，但其间的特点都有明显的差别。所以说对水驱研究明确之后，若研究气驱、三元驱时，可以采用类比的办法，相似可以借用，不同却要专门研究。

第四是流场的隐蔽性。油层深埋地下，我们无法直接观测到，只能用种种物理的、化学的方法进行间接的探测。即使我们取出岩心、做种种项目的实验研究，但由于：（1）地下、地面条件的差异，取出的岩心已和地下的情况，多多少少有些差别了；（2）岩心只是油层极少的一部分，对于整个油层来说，有多大的代表性呢？所以说对流场的研究除了大量录取资料，分析研究。数学模拟之外，经验是非常宝贵的，在某种情况下，甚至是不可替代的。

第五是流场研究的实践性。正由于上面的种种特点，决定了油田开发实践的重要性，也就是大量现场实验是流场研究最基本手段，室内实验和物理模拟，数学模拟只能做为一种补充和原理研究。而且不同的大油田应该根据它的基本特点，有自己的实践和实验内容。

实践性的第二方面含义就是流场的研究必须紧密的为油田开发服务，为提高采收率 and 经济效益服务，离开了这个最基本的经济活动，流场的研究就失去了它的实用价值。

第二章 油层孔隙

油层孔隙是组成流场的细胞，是最常见的流体的存储空间和运动通道。孔隙的形状是极其复杂的，从岩石薄片观察、电镜扫描和注模实验做出的孔隙骨架都从不同的角度描绘出孔隙结构的复杂性。

由于造岩矿物颗粒大小和形状复杂，接触关系不同，造成孔隙形状的千变万化，可以说孔隙虽有亿万个，找不到一对同样的孔隙。

由于粘土矿物的存在及其分布特征不同，形成大孔隙套小孔隙、微孔隙，使本来就形状各异的孔隙更加错综复杂。

在这样复杂的情况下，我们不可能，也没有必要去研究每个孔隙，但我们要认真研究不同类型的孔隙及其总体的变化规律和相互关系，以便于从宏观上掌握住开发好油田的诀窍。

§1 孔隙与孔隙度

砂岩油层多有原生孔隙，经过成岩作用和后生作用多少发生了变化。总的说来，压实作用、压溶作用、胶结作用和沉淀作用是使岩石的孔隙变小，而溶解作用则使岩石的孔隙变大。对于碳酸盐岩石、重结晶作用，白岩化作用都有可能使孔隙变大。除此之外，风化侵蚀作用、构造的水平挤压作用、垂直升降作用，也对孔隙和裂缝的形成起了作用。但对于油田开发工作者来说，更关心的是这些变化的总结果，也就是现在油层的孔隙状况及其对油田开发效果的影响。

岩石中孔隙体积（包括裂缝）占总体积的多少，多用孔隙度来表示。可用下式求得：

$$\text{孔隙度} = \frac{\text{孔隙体积}}{\text{岩石体积}} \times 100\% \quad (2-1)$$

总孔隙体积与总岩石体积之比称做绝对孔隙度或总孔隙度，它包括岩石中所有孔隙、缝隙，不管是连通的还是不通连通的统统算在内。在研究油层时，强调的是连通孔隙度，也就是连通的孔隙体积与岩石总体积之比。

对于裂缝，洞隙比较发育的油层，还应该求出缝隙孔隙度和基质孔隙度，这对评价这类油层是极其重要的指标，有下面关系：

$$\text{孔隙度} = \text{缝隙孔隙度} + \text{基质孔隙度} \quad (2-2)$$

不管是总孔隙度还是连通孔隙度，都是一种表现孔隙体积大小的累计概念，是大孔隙、小孔隙、微裂缝，微孔隙等等的总和，它丝毫不能反映孔隙的复杂情况。为了能较好地讨论孔隙的复杂性和孔隙间的相互关系，分下面几部分讨论。

一、孔隙结构及其研究方法

当前研究孔隙的方法主要有 5 种：压汞法（或离心法）、岩石薄片测量、岩心 CT 剖面、电子显微镜观察研究及注模法。这 5 种方法各有长短，从不同的侧面反映了孔隙的复杂面貌。

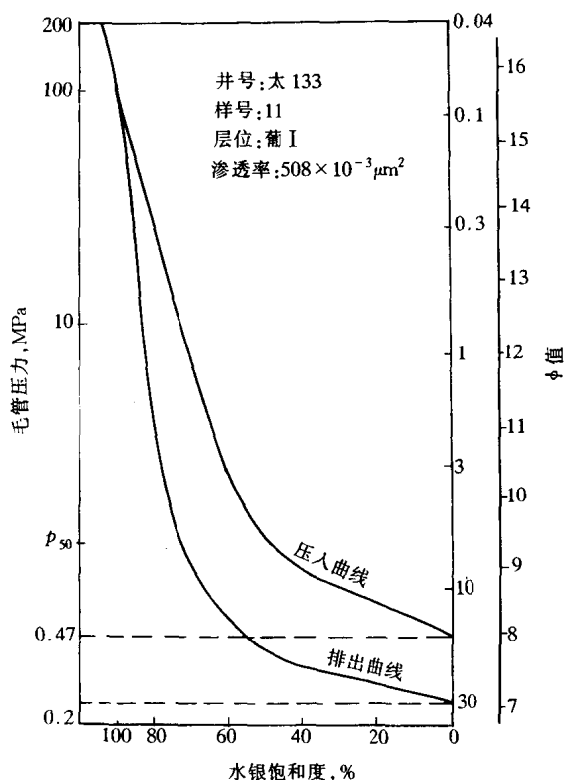


图 2—1 毛管压力曲线

表示了连通喉道的体积。与此类似的还有离心法。

(2) 岩石薄片测量

岩石薄片测量从某一平面（或几个侧面）可以清楚地看到孔隙的大小、形态、分布情况和孔隙间的关系，便于研究和了解造岩矿物、粘土矿物、胶结物与孔隙的关系。如图 2—2 所示，在薄片下可以清楚地看见孔隙及形成孔隙的矿物颗粒（图中的网格是统计用的），以及一个孔隙在这一平面与其它孔隙的通道的形状、个数等，也就是所谓的配位数。问题是这只能看到一个切面，而建立不起空间形状的概念。

(3) 电子显微镜观察研究

电子显微镜扫描可以清楚地看到孔隙空间的立体形象、颗粒表面及粘土矿物的分布形式等。颗粒及孔

1. 研究方法

(1) 压汞法

用压汞法取得的实验数据，可以绘制压汞曲线。根据这些资料，按公式 $p_{Hg} = \frac{7.5}{r}$ （压汞时的压力 = $\frac{7.5}{r}$ ）可以求出孔隙半径（ r ）及不同半径的孔隙所控制的孔隙体积占总连通孔隙体积的百分数。图 2—1 就是用太 133 井岩心做出的压汞曲线和孔隙体积关系图。用这方法求出的孔隙半径主要代表了孔隙的喉道半径，也就是孔隙间相互连通部分的最小半径，求出的体积代表不同喉道半径所控制的孔隙空间体积。所以这种方法求出的体积是可靠的。但是，这些孔隙是些什么样的孔隙就分不清了，而且孔隙和微裂缝在一定条件下可以有类似的压汞曲线。

压汞曲线除了求得上述值以外，还可以通过压入和排出曲线的差别（见图 2—1）进一步研究一些问题。

目前，这两条曲线的差异反映什么问题，看法不一，还有待进一步研究。初步看来，可以认为，排出的水银体积基本代



图 2—2 岩石薄片测量图示

隙表现出极其明显的立体形象，但孔与孔之间的横向关系往往看不全。图 2—3 就是大庆油田的岩心的电镜扫描结果。从图中可以明显地看出孔隙中原生粘土矿物的分布形式。

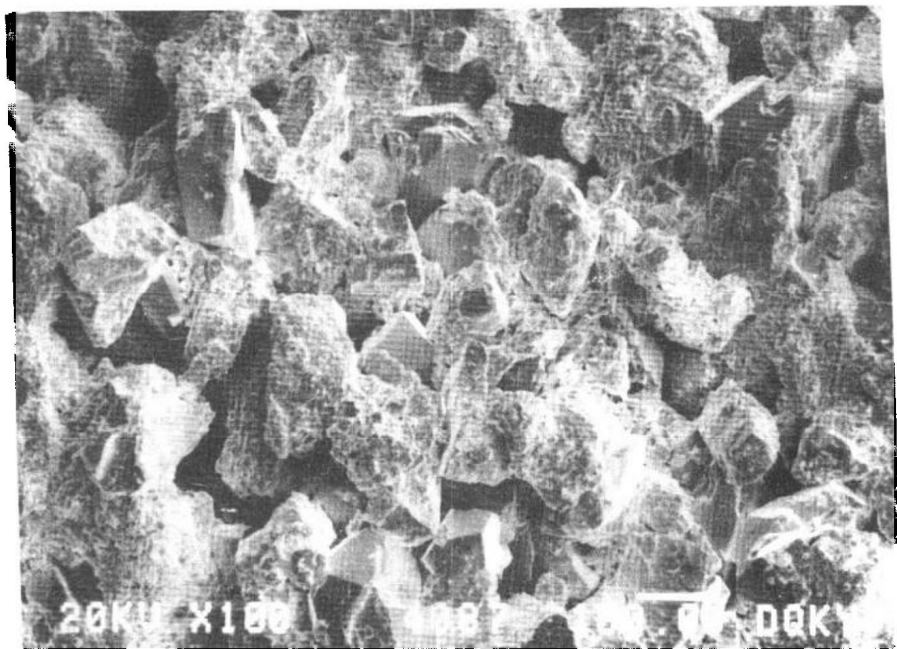


图 2—3 岩心电镜扫描照片（大庆油田）

(4) 注模法

常用伍德合金或环氧树脂注模。注模后可以较形象地看出孔隙空间的立体模型。

(5) “CT”切片法

这是最新发展的技术，不但可以研究孔隙，还可以研究油水分布。

这 5 种研究孔隙结构的方法，各有所长，只有综合起来才可能建立起比较正确的孔隙的空间概念，并了解它与粘土矿物、胶结物及岩石颗粒的关系。目前多是从其中的一种方法提出孔隙研究成果和参数。

此外，最新发展起来的核磁共振测井，也是研究油层孔隙的一种方法，目前还有待于进一步发展。

2. 孔隙结构

任何孔隙是由矿物颗粒骨架组成，这些颗粒的成分是不同的，常有石英、长石、岩屑等。每个矿物颗粒不仅是一个孔隙（或喉道）的骨架，还是构成相邻孔隙或喉道的骨架。

孔隙由于存在粘土矿物，胶结物而复杂化，造成了小孔隙、微孔隙，还可能造成孔隙被分隔、被堵塞，但它们相互之间又多有微通道连接。

孔隙表面由于表面张力和表面电场力的作用，在漫长的地质年代中被优先吸附，优先润湿，造成了孔隙复杂的润湿性，和孔隙中流体分布的三态模型，及成分分布的不均匀性。

孔隙间由喉道与周围孔隙连通，一个孔隙可以有多个喉道，喉道也可以认为是孔隙的延伸部分，所以它具有与孔隙类似的特征。

孔隙一般是很小的，孔隙半径几十微米就是比较大的，但不排除特定条件下的大洞隙，

如石灰岩地区的大溶洞,从钻具放空距离看,直径一米以上的并非罕见。

孔隙结构的这些非均质特性决定了我们研究时,只能采取分层次宏观研究的办法进行,从油田开发角度来看,至少在目前宏观研究仍可以基本解决油田开发问题。

二、表示孔隙及其非均质的参数

研究孔隙首先要研究孔隙非均质,为此许多研究者提出了几项参数,这里仅介绍其中的几种。

①孔隙半径中值 (r_{50}):指对应于水银饱和度 50% 处的孔隙半径值,可从曲线上直接读出。

②孔隙分选系数 (S_p):表示孔隙大小是否分布得比较均匀。计算公式如下:

$$S_p = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} + \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6.6} \quad (2-3)$$

式中的 $\varphi_r = -\log_2 r$; r 为喉道半径。

③相对分选系数 (D):

$$D = \frac{S_p}{D_M} \quad (2-4)$$

式中的均值 $D_M = \frac{1}{3} (r_{75} + r_{50} + r_{25})$ (孔隙分布越均匀, S_p 值越小, D 值也越小)。

④孔隙结构特征参数 ($\frac{1}{D\varphi}$):

$$\varphi = \frac{\lambda^2}{\epsilon}; \quad (2-5)$$

$$\lambda = \frac{l}{L}; \quad (2-6)$$

$$\epsilon = \frac{m_\varphi}{M} \quad (2-7)$$

式中 φ ——孔隙结构系数(卡佳霍夫提出的);

λ ——孔道的平均迂曲度;

l ——真实渗流路程;

L ——岩样表观长度;

ϵ ——流动系数;

m_φ ——流动孔隙度;

M ——绝对孔隙度。

这些参数都是统计结果,所以反映的也都是统计概念。

根据大庆油田科学研究院的研究,孔隙结构特征参数与油层渗透率、驱油效率有一定的

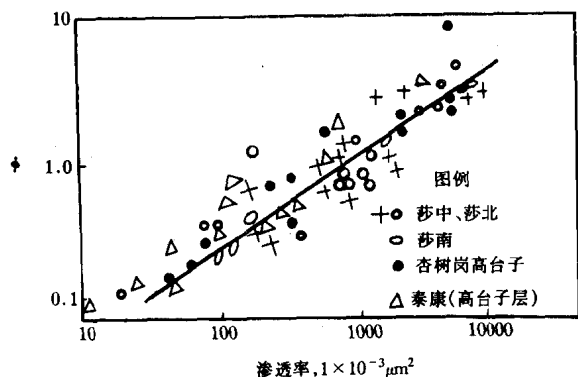


图 2—4 渗透率与孔隙结构特征参数的关系

料绘制的，它表示了不同孔径所控制的孔隙体积的大小是很不同的。这种资料通过做实验比较容易得到。

2. 孔隙与周围孔隙连通情况不同

孔隙与周围孔隙的连通情况对不同的孔隙是不同的。当一个孔隙只有一个方向与其它连通孔隙连通时，这个孔隙水驱基本达不到，而有两个方向以上连通的，水驱才可能达到，即为水驱油的孔隙。有三向以上的连通孔隙，被称作多向连通孔隙。连通方向多少不同的孔隙，驱油效果是不同的。通过用薄片分析，可以比较直观地看到这层关系，可惜它只能提供一个平面。

3. 油层孔隙形状的复杂性

孔隙与喉道并没有严格的界限，从孔隙到喉道本身就是孔隙非均质的表现。这种孔隙形状的复杂性，就构成了不同孔隙间原始油水分布的差别，使驱油效果也可

关系。图 2—4 就是其研究成果之一。

在一些研究报告中，还根据孔隙与周围有几个孔隙连通（即所谓配位数）作为研究孔隙非均质的一种方法，这也是一种较好的方法。

三、油层孔隙非均质性的表现

油层孔隙的非均质性表现在下列几个方面：

1. 任何砂岩孔隙都是由不同孔径的孔隙组成

前述 4 种方法均能用来证明这一结论。图 2—5 中的直方图是根据压汞资料绘制的，它表示了不同孔径所控制的孔隙体积的大小是很不同的。这种资料通过做实验比较容易得到。

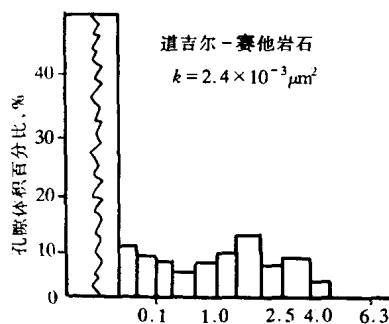


图 2—5 不同孔隙半径所控制的孔隙体积分布图

能出现差别，这些差别虽然细微，但却是不可忽视的。

当这些孔隙由喉道沟通起来，而成为孔隙网络时，把每一个连续的孔隙单独来看，都具有复杂的形态，这就构成了水驱油过程的复杂性。

四、影响孔隙非均质的几个因素

孔隙是岩石颗粒间的间隙或岩内的洞孔，所以孔隙参数（包括孔隙度、孔隙半径中值等）与岩石颗粒之间有很密切的关系。

1. 岩石颗粒大，孔隙也大

在理想状况下，如等直径球的立方堆积，孔隙大小是可以计算出来的。图 2—6 是按正方堆积的等直径小圆球绘制的，圆球半径（ r ）与喉道半径（ R ）的关系可以用下式表示：

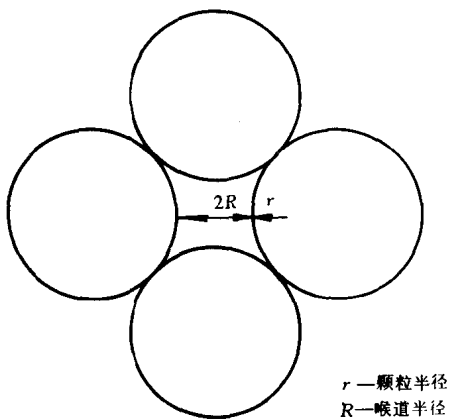


图 2—6 理想的水球在正方堆积的条件下，粒径与喉道半径的关系图

$$R = r \left(\frac{1}{\cos 45^\circ} - 1 \right) \quad (2-8)$$

图 2—7 是把不同的颗粒半径代入上式，求出相应的孔隙喉道半径，绘成的曲线图。

根据大庆油田科学研究院的研究，大庆油田储油层葡 I₁₋₃ 砂岩组的孔隙半径中值与粒度中值的关系是明显的，而且各油田的关系是有区别的（见图 2—8）。

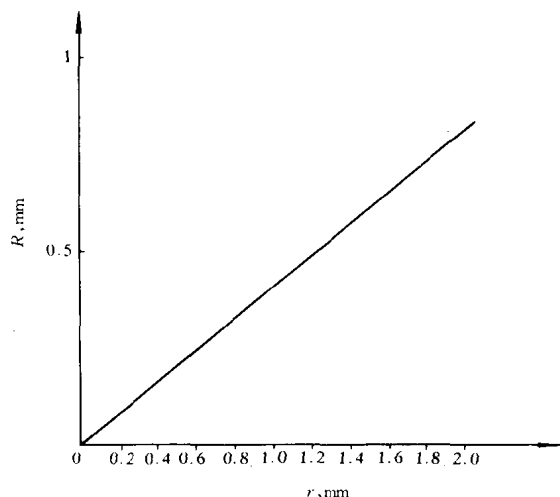


图 2—7 立方体堆积等直径颗粒小球
半径与孔隙喉道半径的关系曲线

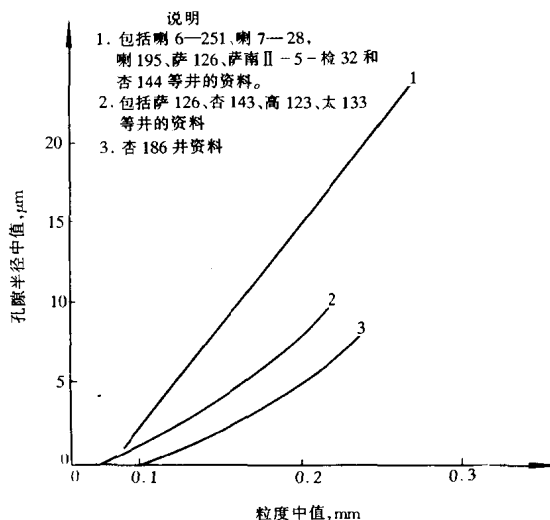


图 2—8 大庆油田葡 I₁₋₃ 砂岩组
粒度中值与孔隙半径中值比较图

2. 岩石颗粒粒径变小，孔隙数目以及孔隙（即颗粒）表面积明显增加

按菱面体堆积计算，得出如图 2—9 和图 2—10 所示的曲线。从曲线可以看出，当颗粒

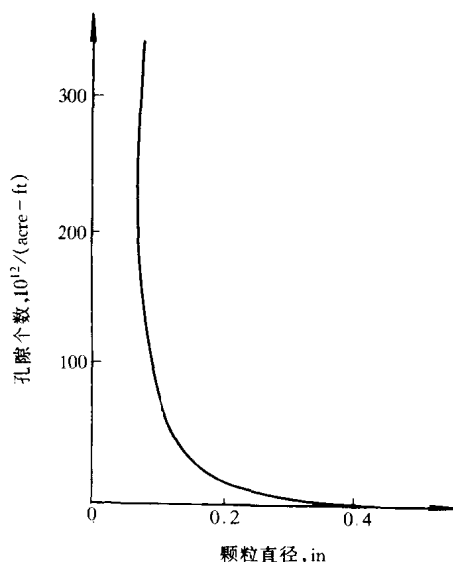


图 2—9 颗粒直径与孔隙关系曲线
(引自《石油地质学》)

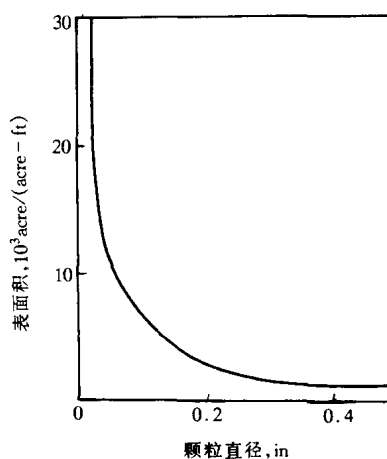


图 2—10 按颗粒大小决定的储集岩，每英亩—
英尺的表面积英亩数（引自《石油地质学》）