

岩石性质对地下液体渗流的影响

〔苏〕 A. 班恩 B. A. 马克西莫夫等著

石油工业出版社

1568

岩石性质 对地下液体渗流的影响

[苏] A. 班恩 B. A. 马克西莫夫等

张朝琛 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了有关岩石性质对地层液体渗流影响的研究成果,如孔隙空间内纵横交错的微观几何形状、天然油藏的宏观不均质性和裂隙性、地层的层理、地层构造及其断裂破坏等等。提出了进行油气田开发设计时考虑这些成果的方法。特别是提出了确定地层液体真实流速的方法,岩样的统计学研究方法,以及确定地层非均质性、油藏的裂缝性及其各参数的方法。阐述了从均质多层地层中驱替油气的基本规律。

本书可供从事油气田开发开采的广大工程技术人员、科研人员和石油院校有关专业师生参考。

А. БАН, В. А. Максимов

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ДВИЖЕНИЕ В НИХ ЖИДКОСТИ

Гостоптехиздат-1962

*

岩石性质

对地下液体渗流的影响

【苏】 А. 班恩 В. А. 马克西莫夫等

张朝琛译

*

石油工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

北京顺义县燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $10\frac{1}{8}$ 字数 240 千字 印数 1—2,400

1981 年 4 月北京第 1 版 1981 年 4 月北京第 1 次印刷

书号 15037·2243 定价 1.15 元

目 录

原编者序	1
前 言	6
第一章 研究多孔介质内部结构的方法	7
第 1 节 地下水动力学与微观液流的研究	7
第 2 节 理想土壤——最简单的微观液流的计算方案	11
第 3 节 微观结构的管式模型及毛管效应	16
第 4 节 利用一般统计学方法的第一批著作	20
第 5 节 多孔介质微观结构的统计性研究	23
第 6 节 平均速度随机变换为局部速度	28
第 7 节 利用多孔介质粒度组成曲线的可能性	34
第 8 节 多孔介质微观结构的类比	40
第 9 节 利用孔道壁间距离分布曲线表征油层的孔隙空间 结构	47
第二章 互溶流体在多孔介质中的掺合过程	60
第 10 节 问题的水动力学提法	60
第 11 节 利用多孔介质的毛管模型	67
第 12 节 多孔介质中的对流扩散	72
第 13 节 测量渗流的“真实”速度	80
第 14 节 对流扩散理论可能有的用途	90
第 15 节 用溶剂从地层中驱油	98
第三章 根据压力恢复曲线确定非均质地层的参数	10
第 16 节 弹性方式渗流理论的基本概念	1
第 17 节 研究含油层的水动力方法	
第 18 节 试验数据的处理	

第 19 节	问题的一般提法	124
第 20 节	折算参数	129
第 21 节	具有环形井底区的井(表皮效应)	133
第 22 节	水力压裂后的试井	137
第四章	距井较远的大范围非均质性对确定地层参数的影响	149
第 23 节	在地层较远部分激动压力场的影响	149
第 24 节	根据两口井的试井数据确定有断层的地层参数	158
第 25 节	由两个不同的半无穷地层所构成的地层	162
第 26 节	具有不渗夹层的多叠层性的地层	170
第 27 节	可任意转渗的多叠性地层	173
第 28 节	渗透性有限的夹层的影响	180
第五章	液体在裂缝性多孔介质中的渗流	191
第 29 节	关于具有双重孔隙介质的概念。初始的研究概况	191
第 30 节	裂缝性多孔岩层中在弹性方式下的渗滤方程	196
第 31 节	裂缝性岩石中最简单的液流情况	204
第 32 节	研究裂缝性岩石中液体的非定常流	209
第 33 节	确定压力再分布过程滞后的时间	215
第六章	两相液体的渗流	231
第 34 节	在两相液流时的广义的达西定律	231
第 35 节	在线性地层中的驱动。饱和度的突变	238
第 36 节	毛管力在驱动过程中的作用	254
第 37 节	多孔介质的毛渗现象	264
第 38 节	各种水驱油问题的模拟及类比	276
第七章	从多层性岩石中驱油的机理	285
第 39 节	多层性以及影响从上述类型的非均质岩层中驱油 的因素	285
第 40 节	实验研究的成果	292
第 41 节	贝克莱-列维莱特的渗流方式及在双层性地层中驱 油时的稳定带	307

附 录	321
A 对流扩散系数与平均速度关系式的推导	321
B 在确定圆盘状裂缝的折算半径时傅立叶系数的求法	325
C 在研究由两个半无穷地层组成的地层中的渗滤时应用傅 立叶变换及其反演	333
D 应用韦伯变换及其反演以研究双叠层性地层中的渗滤	339

原编者序

我们的时代正在飞速进步，而各个知识领域的文献来源也相应地增多，另外，甚至是那些完全不同的科学部门之间的界限也在逐步消失。本书所探讨的地下石油水动力学就完全是这样。

Л.С. 列宾逊在本世纪二十年代末所奠基的地下石油水动力学，在其成长时期已形成为一门宽广的、有一系列重要技术内容的学科，而在它的技术内容中，首先提到的就是如何用于解决油田开发设计问题。地下水动力学，或者有时称之为渗流的水动力学理论，乃是一门研究液、气在多孔介质中，尤其是在作为油、气、水天然滞池的沉积岩层中流动情况的科学。

这一科学的发展可以划分为三个时期或阶段。第一阶段是指 Л.С. 列宾逊的奠基性著作以及美国学者 М. 麦斯盖特在稍后出版的著作问世以前。这一阶段的特征是用工程-试验的方法去解决油井开采和油田开发等问题，并且主要是着重于井而不是把整个地层作为一个整体来研究。在第二阶段，此阶段大致包括到本世纪四十年代末期，在油、气、水渗流理论中各种严格的定量的水动力学方法大量出现。这一时期的特点是对均质液体的渗流进行了大量研究。在数学方面，这些研究一般可归结为研究这种或那种的热传导或位势理论中的边界问题，并且大多数是研究平面问题。开始采用各种水动力学方法来解决油田开发的重大问题，首先是与莫

斯科石油学院的设计-研究局的工作，及以后的全苏石油科学研究所的工作密切相关的。要指出的是，约比上述早 10~15 年，在水工结构的设计实践中，就已经开始类似上述用水动力学方法求解问题了。在 H.H. 巴甫洛夫斯基院士的著作发表以后，水工结构坝底水渗的水动力学计算方法，以及 $\Theta \Gamma \Delta A$ （水电比拟）都获得普遍推广。

在油田开发中，着重的不再是个别井的问题，而是开始重视整个油层的问题、最合适的布井条件、以及在“活塞”式驱动的假设下的液-液驱替问题等。这一时期最突出的特点是，从宏观入手，用连续介质力学方法来探讨的各种渗流问题的提出或命题，具有唯形性及图解性，但有时其命题仍是实质性的。如果说这一学科分支的单相液流问题算是已经完全得到解决的话，那么在有关多相液流问题，首先是提高石油采收率问题方面，则可以说解决得很不够。

地下石油水动力学的现阶段，即第三个发展阶段，其特点是有关许多老大难的问题，主要是多相液，即水油和油气混合物，以及混有固体质点的液体的渗流问题的研究突飞猛进。这些研究的实用方面，主要侧重于拟订各种提高石油采收率及强化采油的方法。

近期地下石油水动力学研究中所用的方法与以前各阶段有很大不同。其主要的是力求在定量的规律中直接反映出均质和非均质液等复杂渗流过程的本质，或者至少也应尽可能近似地反映其本质。这绝对不是摒弃各种行之有效的连续介质力学的解析方法，相反地，而是在各种渗流问题中将其加以发展和完善化。许多研究者还同时在研究这些问题中，开始引用概率-统计法及各种界面现象的物理-化学研究成果。概率-统计法的应用完全适合于多孔介质的本身性质，即将

它视为是许多大小及形状都不一样的固体颗粒，按这种或那种分布规律所编组成的集合。很显然，提高石油采收率的问题及完善油田开发设计方法的问题，都直接与这些方面的研究有关系，并且在很大程度上已越出了石油的水和气体动力学课程和专题的框框。譬如，这些问题都超出了 M. 麦斯盖特的“均质液在多孔介质中流动”（1949）及“采油物理原理”（1953）及 И.А. 恰尔内的“地下水力学基础”（1956）等书的范围了。

值得读者注意的是，本书所论述的是许多地下水动力学中的新问题及其研究近况。本书所依据的除作者等所做的工作外，还包括近几年来在苏联及国外研究所获得的许多重大结果。

本书第一章对多孔介质的内部结构作了研究。在对多孔介质的管状模型及其各种修正作了概述和评论之后，必然就要提到用各种概率-统计方法来研究多孔介质中渗流情况。多孔介质可以视为是按其形状及大小来说具有某种几何分布规律的土壤的固体质点的集合体，而多孔介质中的微观液流，则可视为是液体质点的蠕动过程，这一过程在某一方面可以认为是类似于布朗运动。在第二章中也是从概率的角度对互溶液体在多孔介质中的掺合及对流扩散过程作了研究，揭穿及阐明了在实验室及天然情况下所做试验中发现的扩散系数值异常高的实质。据此，各色各样的指示剂，其中也包括放射性示踪剂，就开始被广泛用于研究渗流，而多孔介质中的对流扩散问题也就成为近代渗流理论中许多重大而又有意义的问题之一。本章附录中给出了一个新的解法，可以用来按任一指示剂的浓度随时间增大曲线，确定渗流的方向及速度的大小。指示剂是从某一井中投入，而从邻井中排出观

测的。

第三、四及五章则谈到在一些十分有前途的新方向上对弹性方式渗流所做的研究，这些新方向是几年前才在Г.И. 巴梭布拉特, А.П. 克雷洛夫及苏联科学院石油研究所的研究组的工作中指出的。第三及四章包含有，在按非定常渗流过程的观测结果以确定各种非均质地层的参数时，如何图解化地应用拉普拉斯积分变换法。此时，首先应满足拉普拉斯变换，并找出有关各井中非定常的产量及压力等原始的实际资料的“图象”。拟订了一些可以不必复原为原函数，而只需按原始实验资料的拉普拉斯图解化就可以确定地层参数的方法。第五章中则探讨了把裂缝性地层视为是一种具有“双重”孔隙性的多孔介质的新物理模型。裂缝性地层可以当作是由许多多岩块以这种或那种堆叠方式组合起来的地层。岩块之间的不密合性就形成了裂缝系，裂缝系本身所特有的孔隙度与各岩块本身的一般孔隙度有所不同。在此类介质中所发生的非定常过程，与在均质多孔介质中所发生的有些不一样。探讨了一些可以按非定常过程观测资料，以估测裂缝性岩石基本特性的方法。特别要指出的是，在本章中还在接近于实际的有关粘度及渗透率随压力而变的假设下，对裂缝性地层的定常渗流作了研究。从而对在定常排液下得出油井的非直线性的产量-压降的指示曲线之原因作了分析和新的解释。

在最后的六及七两章中则论述了水驱油问题中的两相液体渗流问题。在第六章中给出了考虑毛管力时的渗流问题的解。毛管力在水驱油过程中有重大的影响。在第七章中介绍了多叠性地层水驱油实验时所得到的的一些很有意义的成果。对试验中所发现的驱替液前缘的拉乎，以及保证最全面驱油的条件都作了分析。

本书对上列这些问题都作了探讨。作者在研究这些问题中所作的贡献，以及本书所介绍的新成果，都使之有充分根据地认为，此书的问世将是极为及时和如愿的。

教授 H. A. 恰尔内

前 言

目前在进行油、气田开发设计时，都迫切要求用各种连续介质力学方法来求解一系列的问题，而这些问题则都已超出了常用的地下水动力学的范围。读者将注意到，本书内容就是介绍苏联及国外在这一方面所做的研究工作，但主要仍在于介绍本书作者等人在最近所做的工作。在得到这些成果的过程中，得到了苏联科学院通讯院士 A. И. 克雷洛夫及物理-数学博士 Г. И. 巴棱布拉特的指导及质疑，对此，作者向他们表示谢意。

这里是假设读者都已具有大学程度的地下水动力学知识。所以作者在编写本书时是想作为现有教程，譬如如 И. А. 恰尔内的“地下水动力学基础”（1956）的补充读物。许多关系式的详尽的论证，凡是以前已发表过的，本书就尽可能将其略去，但均列举有关的文献出处。

作者希望，所介绍的大部分材料，不仅对于油、气开采工业的专家，而且对于研习多孔介质中液体渗流问题的人都能有所裨益。

本书是由原先独立成篇的各章编纂在一起的，各章节分别由以下各人写出：B. H. 尼可莱耶夫斯基写第 1~8, 10~16 各节，附录 A 及第 9 节则由 A. Ф. 波哥莫洛娃写出，第 17~28 节和附录 B、C 及 D 是 B. A. 马克西莫夫写的，第 29~33 节由雅柯西·班，第 34~38 及 41 节由 B. M. 黎日克，第 39~40 节由 B. Г. 奥冈德然扬茨等人分别执笔。

第一章 研究多孔介质内部结构的方法

第 1 节 地下水动力学与微观液流的研究

在油、气田开发设计时（以及在其他各种渗流计算的情况下）的基本工程问题，是确定井底的压力降落和地层中液体流量之间的联系。在目前，现有的多孔介质中液体的渗流理论，已能对最常见的一些实际情况给出这一问题的详尽解答，但在计算时仍必须作很多简化。

在建立古典的渗滤理论时，系利用一般有关连续介质力学的概念，也即是在探讨井排之间的地下渗流时，可以把地层划分成满足下列要求的单元宏观体。所选取的宏观体若与油滞的外表尺度（井距）相比应当是足够小，以致我们感兴趣的所有的参量之平均值（首先是流速）彼此之间没有差别。与此同时，单元体，也即据以求各参数平均值的区域，若与介质内部结构的特征尺度（例如，与颗粒的直径或裂缝性岩石之缝隙长度）相比，则应当是足够大，以便在此单元体内，能包括该地层中介质骨架的颗粒之间一切的配搭方式。相应地决不能把那些裂缝的长度足可与井距的大小相比的裂缝性岩石视为连续介质。

沿座标的 i 轴方向的平均速度——渗滤速度 w_i ——可定义为在单位时间内，在单元体 dV 与所考察的 i 轴正交的单位面积上通过的液体流量。在 dV 体积内垂直于渗滤速度

向量的平面上,孔隙空间各点的压力的平均值,则可取作为压力 p 。 w_i 和 p 值的大小,与毗邻各单元体中的渗滤速度及压力的关系,可用一些有名的微分方程式联系起来[19,35,42]。

引入渗滤速度(这仅是流体在多孔介质中渗流的一个动力特性)对于求井的流量-产量的计算来说是完全足够的。在这些计算中为了简化起见,可以假定整个地层体积是被某一以活塞式推进的流体所充填。因为在很多实际情况中成功地应用了这种活塞式推进的方案,曾带来了一个不正确的概念,即所有的流体在实际中,都是以某一真实速度作活塞式推进的。因而常把实际中见到的与这一设想为均质液流的简化方案偏差,作为不能用水动力学方法研究地下渗流的证据。

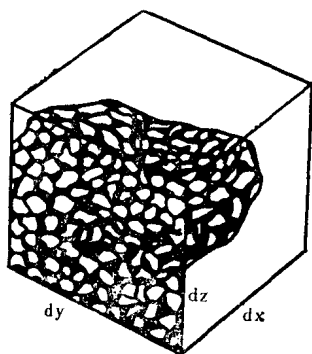


图 1 真实多孔介质的单元宏观体

特别是利用指示剂确定“真实”流速的初步试验的成果,以及裂缝性油田的开采资料,看来都是不清楚的。当然,其原因就是上面所述的简化概念。

事实上,单元宏观体内是由众多的固体颗粒互相堆砌而成的介质骨架(图1),而液体系沿很多的微观流管在流动,并且不同的液流质

点是以不同的速度运动着。例如,那些距流管壁较远的液体质点,就比靠近介质骨架壁的液体质点具有较高的运动速度。而贴在壁边的质点则不能移动——由于粘滞力使其速度等于零。

微观流管系是极为复杂的。这些流管彼此穿插、扩大和

缩窄,直接转入邻近的流管,以致于要想在实际的多孔介质中划出一条与邻近流管隔开的孔道是不可能的。实际的多孔介质的特点就是孔隙空间的微观结构是杂乱无章的,介质骨架中的颗粒排列是极其混乱的,而且其形式也是各式各样的。因此自然可以假设,实际多孔介质内部结构的几何形态具有随机性。

所谓随机的微观结构可理解为这样的一种结构,即由于其结构复杂,无法预先说出任意猜测的 dV 内部的某一点是属于孔隙空间,还是属于介质的骨架。这里能说的只是此点落于孔隙空间之概率(此一概率就等于介质的孔隙度)。

为了描述具有随机性微观结构的孔隙空间,以及建立液体在此种孔隙空间中的渗流理论,必须用各种数学统计法[6, 46]。此时主要的困难如下:首先在于如何划成某种统计研究用的目的物,此一目的物能充分而全面地代表微观的液流流管,同时还不需要把多孔介质看成某种形式略为规则的东西。其次是要决定用什么样的方法去求所需特性的平均值,此种方法要能得出从连续介质的立场看来,对于创建古典的渗滤理论是有用的某些参数。

于是,还在渗滤的统计性理论建立之前,为了使这种统计理论能得出成果,就必须直接研究各平均参量之间的联系。可以说,在此种情况下对微观结构进行统计性研究似乎是多余的。事实上并非如此。

在作为连续介质力学的一个组成部分的地下水动力学中,存在着两个分支:第一个分支是用试验的方法找出每一具体情况的各个基本关系,譬如达西定律就是一例;第二个分支是研究微观的流动情景,并必须进一步用统计求平均值的方法,找到要求的新的宏观规律性,新的连续介质的力学

定律。可以完全撇开这一种或另一种研究方法，但是在某些情况下，极为简单而有效的乃是第一个分支（例如在求渗透率的情况下），而在另一些情况下若忽视第二种方法则可能过于经验主义。

除此而外，若试图把有关地层中的渗流问题都归结为连续介质力学问题也是令人费解的。尽管如此，这一分支是可用于大多数实际地层的，因为在天然储层中流动的液体质点所通过的是为数众多的各式微观孔道，而且实际上影响其流动的乃是所有这些微观孔道的某些平均值，而不是某一个别的毛细管、孔洞及裂缝的参数。诸如在材料力学中，感兴趣的是整个杆件的变形，而不是去研究结晶网格的变形；就像在地下水动力学中，重要的是液流的某些平均参数，而个别毛细管中的液流并不是研究的目标。

统计性研究的目标应当是处于单元宏观体内部的多孔介质上某点的特性值，例如特征函数 $X(M) = X(x_1, x_2, x_3)$ 就是用下列方法确定的：如 M 是介质中孔隙空间的某一点，则 $X(M) = 1$ ；如 M 是属于介质骨架，则 $X(M) = 0$ 。在此种情况下，有关微观结构随机性的假设，就归结为把 $X(M)$ 视为是随机性函数。

孔隙空间内 M 点的另一可能的特征值是，位于此点的液体质点的运动速度的大小和方向。由于内部结构的杂乱和不规则性，液体质点的实际速度乃是孔隙空间的 M 点的随机函数。今后就称它为局部速度。因为流经孔隙空间的液体具有粘滞性，所以局部速度逐点不断发生变化。于是，当液体流经单元宏观体内的多孔介质时，就产生一液体质点局部速度的连续的随机场。

这样的随机速度场以前在研究与液体紊流有关的水动力

学中就曾遇到，所以对孔隙空间中随机的局部速度场，是可以利用以往已拟制的数学工具[5, 32, 46]的。但是局部速度场与紊流中的瞬时速度场仍有所区别，即不宜把所有的数学方法都毫无变化地生搬硬套[29, 59]。最重要的区别就在于：紊流的瞬时速度场的随机性之产生，是与高雷诺数的紊流之不稳定性有关，而渗流的随机的局部速度场，则是由于储层微观结构的“稳定”的随机性而引起的。

在转入论述多孔介质微观结构的统计性研究的基本内容以前，先对那些把多孔介质设想成某些有规则的几何模型，譬如用毛管束来模拟多孔介质等有关著作，加以概括介绍是合宜的。这样做的重要性在于可指出这些模型与上述统计法的定性的区别，在统计法中是以多孔介质可假设成一特殊的数学模型为依据的。

第 2 节 理想土壤——最简单的 微观液流的计算方案

地下水动力学发展史是从 1856 年达西的著作发表时开始的，在他的论著中载明用试验方法确定出：经过装砂管的液体流量与压力降落之间存在着正比关系。进一步研究就得出了比例系数的概念；比例系数是表征多孔介质特性的渗透率 k 被液体粘度 μ 除后所得之商数，此时达西定律就成为下列形式

$$w = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (2.1)$$

式中 Δp ——在长为 l 的多孔介质上的压力降。

这样就阐明了多孔介质一个最重要的特性——多孔介质的渗透率。但是在建立近代地下水动力学各基本物理原则的