

“九五” 中国石油天然气集团公司级重点教材

高等学校教学用书



渗流力学

● 翟云芳 主编

石油工业出版社

12

“九五”中国石油天然气集团公司级重点教材

高等学校教学用书

渗流力学

翟云芳 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以研究油、气、水在地层多孔介质中的流动形态和运动规律为对象,以油藏中能量供应与消耗为核心,以渗流的基础规律——达西定律为基础,遵循由浅入深的认识规律,系统地介绍了不可压缩液体稳定渗流理论、弱可压缩液体不稳定渗流理论、两相渗流理论、气体渗流理论、双重介质渗流理论、非牛顿液体的渗流、特殊地质因素及分形渗流理论等。

本书主要作为高等学校石油工程专业教材,也可供其他相关专业人员学习使用。同时,本书亦可供从事油气田勘探和开发的科学研究人员和矿场技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

渗流力学/翟云芳主编.

北京:石油工业出版社,1999.4

“九五”中国石油天然气集团公司级重点教材 高等学校教学用书

ISBN 7-5021-2513-2

I. 渗…

II. 翟…

III. 渗流力学-高等学校-教材

IV. 0357.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 05728 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 300千字 印 3001—4000

1999年4月北京第1版 2002年6月北京第3次印刷

ISBN 7-5021-2513-2/TE·2055

定价:16.00元

前 言

本教材是在 1981 年翟云芳主编的《渗流力学》教材的基础上补充、完善而成。原教材自 1981 年起在大庆石油学院已使用十多年, 部分石油院校也曾以此作为教材使用过。在使用过程中曾根据专业需要和讲授中的经验, 多次进行修改补充。1996 年由原中国石油天然气总公司人教局选定为“九五”中国石油天然气集团公司级重点教材。

本教材是一门专业基础性的教材。它与一般专业基础性课有着同样的作用, 是把基础课程中所学的知识应用到专业中去的一个中间桥梁, 因此在学习本门课程之前, 应当掌握必要的数学、物理、力学等基础知识。

这本新编的教材具有以下几方面的特点:

1. 本书加强了基础理论知识介绍, 又具有很好的导向作用, 克服了仅以数学模型代替渗流过程中物理机理的抽象化的研究方法。
2. 概念准确、简练、深入浅出, 不仅清晰阐明了物理概念, 而且保持了理论上的严谨性。
3. 充分体现了主编和参编者在教学上多年来的探索成果和经验。
4. 不仅介绍了基础渗流力学, 而且反映了学科的发展前沿(如分形等)以便因材施教。
5. 每章都附有思考题, 在教学中对学生思维具有启发性, 书后附有习题, 有助于学生对本教材内容的消理解。

本教材由翟云芳负责总体内容的构建。其中第一章至第九章由翟云芳编写, 闫宝珍、刘义坤、刘振宇、尹洪军分别参加部分编写工作。第十章由闫宝珍编写, 第十一章由刘振宇编写。

本书由葛家理教授主审。葛老师能站在学科的前沿对本教材进行严格的审阅, 使编者受益匪浅。在编写过程中还参考了国内外的有关教材, 受到不少启发和帮助, 在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平所限, 本教材还存在不足和缺点, 诚恳欢迎大家提出宝贵意见。

编 者

1998 年 8 月

目 录

绪 论	(1)
第一章 渗流的基础知识和基本定律	(2)
第一节 油气储集层	(2)
第二节 渗流的基本概念	(5)
第三节 渗流过程中的力学分析及油藏驱动方式	(8)
第四节 线性渗流与非线性渗流	(10)
思考题	(12)
第二章 单相液体的稳定渗流	(13)
第一节 渗流数学模型的建立	(13)
第二节 单相液体稳定渗流的数学模型的解	(15)
第三节 井的不完善性	(20)
第四节 稳定试井	(21)
思考题	(22)
第三章 多井干扰理论	(23)
第一节 多井干扰现象的物理过程	(23)
第二节 势的叠加原则	(25)
第三节 镜像反映法及边界效应	(28)
第四节 等值渗流阻力法	(37)
第五节 复变函数理论在渗流力学中的应用	(44)
思考题	(53)
第四章 弱可压缩液体的不稳定渗流	(54)
第一节 弱可压缩液体在弹性多孔介质中不稳定渗流的物理过程	(54)
第二节 不稳定渗流的基本微分方程	(55)
第三节 无界地层定产条件下微分方程的解	(59)
第四节 有界地层定产条件下微分方程的解	(61)
第五节 多井干扰	(63)
第六节 常规不稳定试井分析方法	(63)
第七节 典型曲线拟合的试井分析方法	(73)
思考题	(79)
第五章 油水两相渗流的理论基础	(80)
第一节 影响水驱油非活塞性的因素	(80)
第二节 等饱和度平面移动的基本微分方程	(81)
第三节 平面单向流等饱和度平面移动方程的应用	(86)
第四节 平面单向流两相混合带的压力	(87)
第五节 平面径向流等饱和度平面移动方程的应用	(88)

思考题	(90)
第六章 油气两相渗流 (溶解气驱动)	(91)
第一节 混气液体渗流的物理过程	(91)
第二节 混气液体渗流的基本微分方程	(92)
第三节 混气液体的稳定渗流	(95)
第四节 混气液体的不稳定渗流	(98)
思考题	(102)
第七章 天然气渗流	(103)
第一节 天然气渗流的基本微分方程	(103)
第二节 天然气的稳定渗流	(105)
第三节 天然气井的稳定试井	(110)
第四节 天然气的不稳定渗流	(113)
第五节 天然气井的不稳定试井	(114)
思考题	(117)
第八章 流体在双重孔隙介质中渗流的理论基础	(118)
第一节 基本概念	(118)
第二节 双重孔隙介质中单相弱可压缩流体渗流的基本微分方程	(119)
第三节 双重孔隙介质中的渗流理论在不稳定试井中的应用	(120)
思考题	(123)
第九章 非牛顿液体的渗流	(124)
第一节 流变性的基本概念	(124)
第二节 非牛顿液体的分类	(124)
第三节 非牛顿液体的渗流	(127)
思考题	(132)
第十章 特殊地质因素下的渗流理论	(133)
第一节 渗透率各向异性	(133)
第二节 均质各向异性地层中流体不稳定渗流基本微分方程	(134)
第三节 均质各向异性地层中流体稳定渗流规律	(135)
第四节 多井干扰	(137)
第五节 均质各向异性地层中流体不稳定渗流规律	(142)
思考题	(144)
第十一章 分形渗流理论基础	(145)
第一节 分形理论概述	(145)
第二节 油藏中的分形	(148)
第三节 分形渗流数学模型的建立	(149)
第四节 基本微分方程的解	(154)
思考题	(158)
总习题	(159)

附录 1 无界地层定产条件下微分方程的解——分离变量法 (167)

附录 2 幂积分函数表 (173)

附录 3 常用参数单位及相互关系 (175)

参考文献..... (176)

绪 论

渗流力学是研究流体在多孔介质中流动规律的一门学科。渗流现象大量地存在于生产和生活中,在冶金、化工等工程中遇到的渗流问题称为工程渗流。对于在人体和动物血管中出现的渗流现象称为生物渗流;而地下水、石油和天然气在地下储集层中的渗流一般称之为地下渗流。

地下渗流力学起源于 19 世纪,随着地下水的开发和利用,开始出现了地下水动力学理论。1856 年法国工程师亨利·达西 (Henri Darcy) 在总结前人经验的基础上,通过室内实验,建立了古典渗流力学的基本定律——达西定律,这一定律反映了水在孔隙介质中流动的线性规律。之后,裘比 (J. Dupuit) 又在达西定律的基础上,研究了单向和平面径向渗流。不论是达西还是裘比,他们提出的公式都是反映流体在多孔介质中的稳定渗流,这些研究成果奠定了稳定渗流的理论基础,对当时的理论与生产实践曾起过比较重要的作用,直到现在仍有实用价值。

稳定渗流主要描述流体在多孔介质中运动时的一种平衡状态,这种平衡状态不随时间变化,因此稳定渗流的公式中不包含时间的因素,但事实上稳定渗流只是一个有限时间范围内的一种暂时平衡状态,它无法说明从一个状态到另一个状态的整个发展过程,所以这一理论的应用受到了限制。1935 年,齐斯 (C. V. Theis) 首先发表了非稳定渗流的研究成果,从而使渗流力学进入一个新的发展阶段,这一理论到 50 年代就发展得比较完整,包括了在稳定渗流中已行之有效的叠加原理、映射法等也应用到非稳定流中,从而使井群干扰和边界影响等问题得到了解决。

随着油田开采技术的发展,从一开始单纯依靠天然能量驱油逐渐发展到用注水注气方法来开采石油,于是开始出现了多相渗流,贝克莱—勒弗莱脱 (Buckley-Leverett) 关于水驱油非活塞式驱替理论的提出,奠定了多相渗流的基础,拟压力方法的引入使油气两相渗流得到了有效的解决。上述问题都是研究流体在单一孔隙介质中的流动,随着裂缝性油田的开发而发展起来的裂缝—孔隙双重介质中流体的渗流理论,使得渗流力学这门学科的内容变得更加丰富。

为了更加合理有效地利用地下资源,已经采用多种新的工艺与技术,同时也为渗流力学提出了新的研究领域。例如,由于注入热水等引起地层内温度变化的非等温渗流、因在开发过程中介质的孔隙度渗透率变化引起了影响流动规律的变形介质渗流、以及建立在分形几何基础上的分形渗流理论等等。在研究新的问题时,对于一些复杂的现象,首先要进行室内实验,例如,考虑流体与岩石表面特性的微观渗流等,然后,在获得直观认识的基础上,再建立能够定量描述的理论模型,因此,实验技术对渗流力学的发展起着不小的作用。计算机先进技术和现代数学方法的应用,有力地改进了渗流力学的研究条件,必将积极地促进本门学科的迅速发展,为油田开发提供更加坚实的专业理论基础。

第一章 渗流的基础知识和基本定律

第一节 油气储集层

油气储集层是油气储集的场所和油气运移的通道。它有着极其复杂的内部空间结构和不规则的外部几何形状，它是渗流的前提条件，所以有必要对其进行了解。

一、内部空间结构及其简化

油气储集层有多种形式，若按其内部空间结构特点可分为三种介质七种结构，即单纯介质、双重介质和三重介质。其中，单纯介质包括：粒间孔隙结构、纯裂缝结构和纯溶洞结构；双重介质包括：裂缝—孔隙结构、溶洞—孔隙结构和裂缝—溶洞结构；三重介质为孔隙—裂缝—溶洞结构。下面将分别介绍。

1. 粒间孔隙结构

这种结构一般存在于砂岩油藏中，它是由大小及形状不同的颗粒组成，颗粒之间被胶结物充填，由于胶结不完全，在颗粒之间便形成了孔隙，成为储集油气的空间和流动的通道，如图 1-1 (a) 及图 1-2 (a)，其中黑色部分为胶结物，斜线部分为固体颗粒，空白部分为孔隙空间。

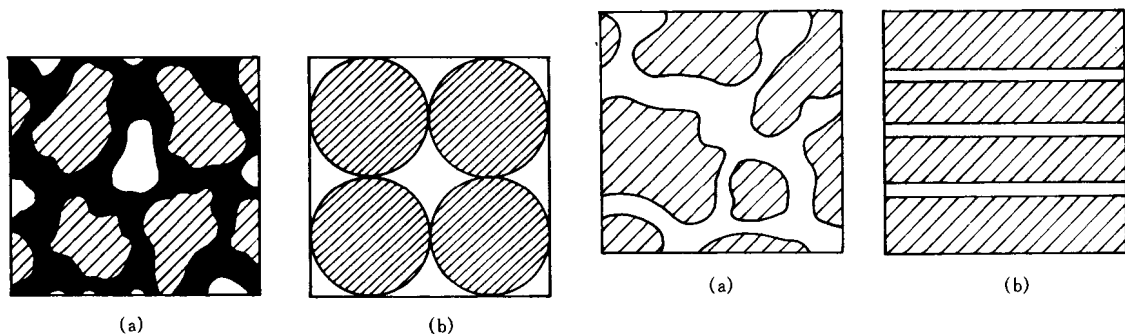


图 1-1 粒间孔隙结构示意图

(a) 真实情况；(b) 理想情况

由此可见，孔隙的结构是随机的和极不规则的，对油气渗流的影响也是极难预测的，为此，人们对其提出了种种假设模型。最早期的简化模型是把岩石看成是由等直径的圆球颗粒组成的，流体在这些圆球的间隙中储集和流动，如图 1-1 (b)；进一步的简化模型是将岩石连通的孔道看成是等直径的毛细管，岩石则是由这些等直径的毛细管束所组成，如图 1-2 (b)，因而可以把一般管道的水动力学运动规律引入渗流力学，显然这种假设与实际情况有很大的差距，为此人们对以上假设作了进

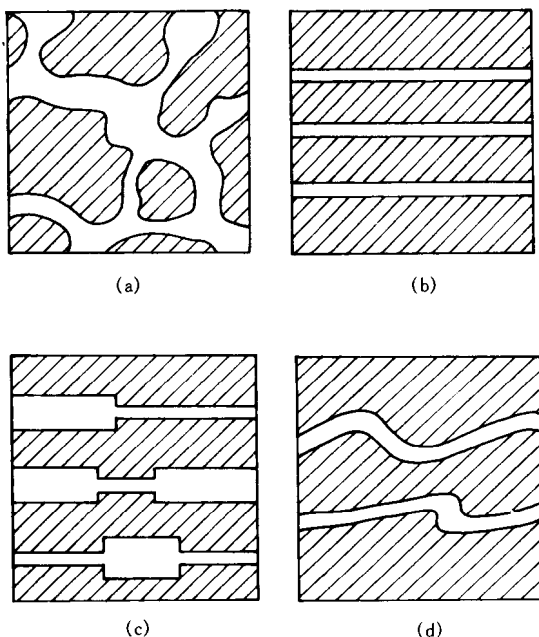


图 1-2 孔道及其简化示意图

(a) 真实孔道；(b)、(c)、(d) 简化孔道

一步修正,即引入了变直径的、弯曲的毛细管束模型,如图1-2(c)及图1-2(d)。事实证明,这些简化模型对渗流力学的研究具有较大意义。

2. 纯裂缝结构

这种结构一般存在于致密的碳酸盐岩油气层中,裂缝是储存油气的空间和流道,常被简化成规则的网格状,如图1-3。

3. 纯溶洞结构

多存在于碳酸盐岩中。严格地讲,在溶洞中的流动已不属于渗流范畴,其流动规律应遵循奈维—斯托克斯方程。

4. 裂缝—孔隙结构

简称缝—隙结构,是双重介质中的一种。流体在这种双重介质中的渗流会形成两个渗流场。一是在颗粒孔隙介质中,二是在裂缝介质中,因而,存在两个孔隙度和两个渗透率,并且,两种介质之间流体会发生交换现象,其简化模型为粒间孔隙介质简化模型与纯裂缝结构的组合,如图1-4。

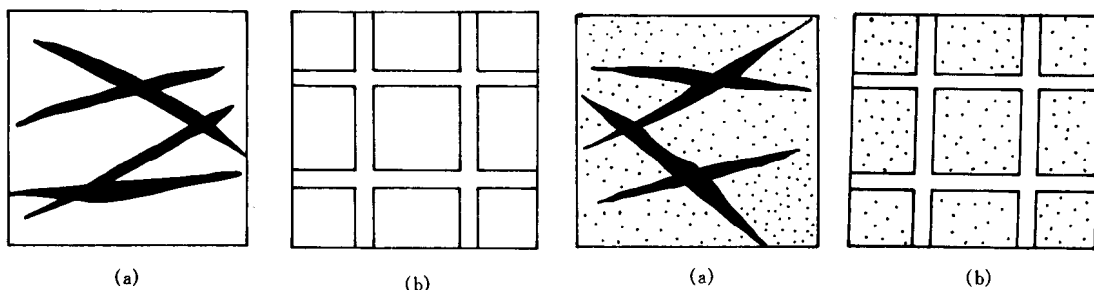


图1-3 纯裂缝结构示意图

(a) 真实裂缝; (b) 理想裂缝

图1-4 裂缝—孔隙结构示意图

(a) 真实情况; (b) 理想情况

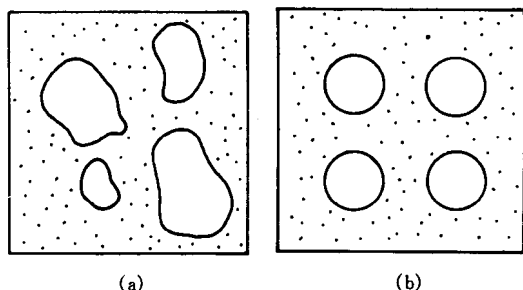


图1-5 溶洞—孔隙结构示意图

(a) 真实情况; (b) 理想情况

5. 溶洞—孔隙结构

简称洞—隙结构,属双重介质中的一种。它的结构不仅是双重的,而且流体在每个介质中的流动规律也不相同。在孔隙介质中流体的流动属于渗流范畴,而在溶洞中的流动有时已不属于渗流范畴,其运动规律应遵循奈维—斯托克斯方程。我们把大小不等、形状不规则、分布杂乱的洞穴,简化为大小相等的球形并均匀分布在地层中,如图1-5。

6. 裂缝—溶洞结构

简称缝—洞结构,属双重介质中的一种。它的结构不仅是双重的,而且流体在每个介质中的流动规律也不相同,在裂缝介质中流体的流动属于渗流范畴,而在溶洞中的流动已不属于渗流范畴,其运动规律应遵循奈维—斯托克斯方程。其简化模型为裂缝简化模型与溶洞简化模型的组合。

7. 溶洞—裂缝—孔隙结构

简称洞—缝—隙结构。它是三种单纯介质的组合，常存在于碳酸盐岩的油气层中。油气在这种结构中的渗流规律目前研究甚少，是有待人们研究和探索的课题。

二、外部几何形状及其简化

对于砂岩油藏，地下的流体常常储集在各种构造中，最常见和最典型的是背斜构造。下面即以背斜构造为例，阐明在静态条件下地下流体在其中的分布情况，并对其外部几何形状进行简化。

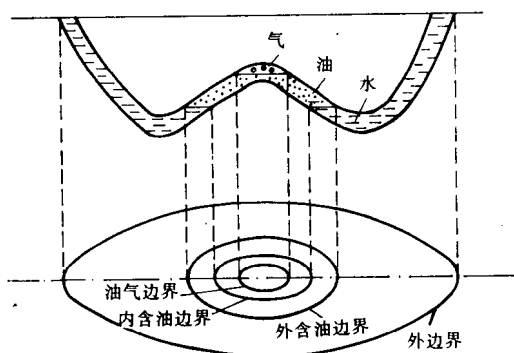


图 1-6 油藏外部形状及其简化示意图

若背斜构造中同时存在油、气、水，则它们将按重力分异原则分布，即天然气在顶部，油在其下部，而水则在构造的侧翼（称为边水）或在构造底部（称为底水）。由于油藏的厚度和隆起高度相对于其平面尺寸来说常常很小，只要将油藏构造中各点的高差以位能形式予以考虑，则可以用水平的构造油藏简化实际的油藏。这种水平油藏是通过对实际构造进行水平投影得到的，如图 1-6。

油和水的接触面称为油水分界面，在平面上的投影称为油水边界，严格地说，可划分为内含油边界和外含油边界，油气接触面的水平投影称为油气边界。若油藏有露头，且露头外有水源供应，则露头在平面上的投影称为供给边界，若边界是封闭的，则油藏边界在平面上的投影称为封闭边界。

由于实际背斜构造在平面上投影的几何形状很不规则，为研究问题方便起见，常对其进行进一步简化成两种规则的几何形状：条带形油藏和圆形油藏。方法是若长轴与短轴的比小于 3，则简化成圆形油藏；若长轴与短轴的比大于 3，则简化成条带形油藏。

三、油气储集层的特点

1. 储容性

油气储集层作为一种多孔介质，最重要的特点之一是储容性，即储存和容纳流体的能力。孔隙度是表征储容性的一个重要物理量。

我们定义：岩石内总的孔隙体积占岩石体积的百分数为绝对孔隙度，用公式表示为：

$$\phi_t = \frac{V_t}{V} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 V_t ——总的孔隙体积， m^3 ；

V ——岩石的体积， m^3 ；

ϕ_t ——绝对孔隙度，1。

在计算油气藏绝对储量时， ϕ_t 值具有重要意义。

事实上，在总的岩石孔隙中，存在一部分的“死孔隙”，即不能使流体流过的那部分孔隙，这部分孔隙对油气渗流是无效的。因此，我们定义：岩石中的有效孔隙体积（除去无效孔隙体积后的孔隙体积）占岩石体积的百分数为有效孔隙度，其公式为：

$$\phi = \frac{V_e}{V} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 V_e ——有效孔隙体积， m^3 ；

ϕ ——有效孔隙度，1。

在计算油藏的可采储量时， ϕ 值具有重要意义。

另外，表征储容性的另一个物理量是岩石的压缩系数，将在第四章予以介绍。

2. 渗透性

渗透性即多孔介质允许流体通过它的能力。

渗透性是油气储集层的重要特征之一，表征渗透性的量为渗透率。与渗透率有关的概念有：绝对渗透率、相渗透率和相对渗透率。

若孔隙中只存在一相流体，则多孔介质允许其通过的能力称为绝对渗透率。

若孔隙中存在几相流体，则多孔介质允许每一相流体通过的能力称为每相流体的相渗透率，也称有效渗透率，相渗透率与绝对渗透率的比值称为相对渗透率。

3. 比表面性

由于多孔介质中存在大量的孔隙空间，所以存在大量的内表面积。定义：总表面积与岩石体积的比值为比表面。从很多方面看，比表面大是多孔介质的重要特性，比如，在 1m^3 的粉砂岩中，内表面积在 $20\,000\text{m}^2$ 以上，比表面积为 $20\,000\text{m}^{-1}$ 。由于多孔介质含有极大的比表面，所以，流体在其中的流动具有很大的渗流阻力。

4. 结构复杂

结构复杂是多孔介质的基本特性。

不同结构的孔隙其成因不同，组成岩石的颗粒大小、形状、表面粗糙程度以及胶结程度的变化都是导致孔隙结构复杂的原因，如图 1-7。这给渗流力学的进一步研究带来很大的困难。

正是因为多孔介质具有结构复杂和比表面大这两大特性，决定了流体在其中渗流的特点，即渗流阻力大，渗流速度慢。



图 1-7 砂岩孔隙空间的铸体

第二节 渗流的基本概念

一、渗流的三种基本几何形式

在实际问题中，由于油气藏几何形状和布井方式的不同，使得实际渗流形式比较复杂。但是，为了便于对渗流问题的分析和研究，我们从实际渗流中提出了共同的特性，归纳出三种基本的渗流形式。

1. 平面单向流

例如，实验室中的岩心渗流和行列井网中井排之间的流体渗流等，都可视为平面单向流，如图 1-8。平面单向流的特点是：流线相互平行，垂直于流动方向的截面上各点的渗流速度相等；如果流动是稳定渗流，那么流动方向上任一点的压力只是沿程位移 x 的线性函数。

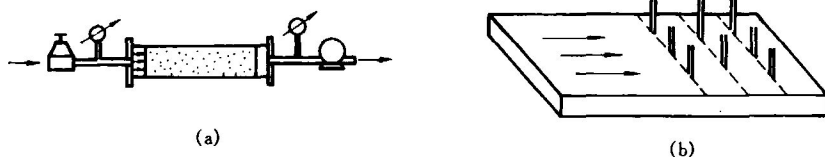


图 1-8 平面单向流示意图

(a) 岩心测试示意图；(b) 直线井排间渗流示意图

2. 平面径向流

例如，在井底附近的渗流即为平面径向流，如图 1-9。其渗流特点是：流线呈放射状，愈靠近井底其渗流面积愈小而渗流速度愈大，愈远离井底其渗流面积愈大而渗流速度愈小。

3. 球形径向流

若部分钻开油藏，则在井底附近将出现球形径向流。例如，若开采的油藏存在底水，或油井仅钻开油层的顶部，这种渗流方式即为球形径向流。其渗流特点是：渗流面积成球面形，流动呈现三维流动，如图 1-10。

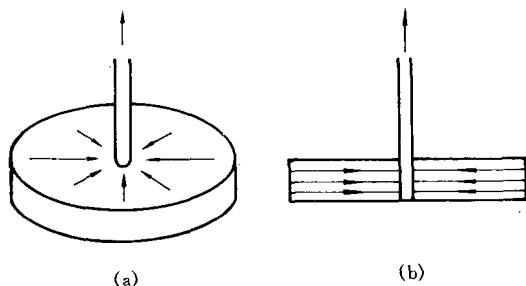


图 1-9 平面径向流示意图

(a) 立体图；(b) 切面图

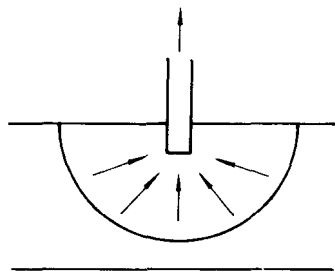


图 1-10 球形径向流示意图

二、渗流速度

渗流速度的定义：流体通过单位渗流面积的体积流量，公式为：

$$v = \frac{q}{A} \quad (1-3)$$

式中 v —— 渗流速度， $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / \text{m}^2$ ；

q —— 体积流量， m^3 / s ；

A —— 渗流面积， m^2 。

需要特别指出的是，渗流速度虽然是速度的概念，但严格地说，它与力学中所定义的速度物理含义有所不同。我们知道，孔隙结构变化复杂，流体的渗流过程是其流动方向不断改变的过程，因此，其速度方向是不确定的。从力学观点看，渗流速度仅具有速度的因次而已，它是在宏观统计平均意义上的速度概念。如果说渗流速度有方向，那么其方向可认为是由高压端指向低压端的方向。

渗流速度在渗流力学中是一个极为重要的概念。由于它的引入，避开了微观范围内复杂的水动力学现象，从而使人们对极其复杂的渗流过程有一个有效的研究方法。

在引入渗流速度的同时，又引入了真实渗流速度的概念，其公式为：

$$v_{\phi} = \frac{q}{A_{\phi}} \quad (1-4)$$

式中 v_{ϕ} —— 真实渗流速度， $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / \text{m}^2$ ；

A_{ϕ} —— 真实渗流面积， m^2 。

其中，真实渗流面积的意义与渗流面积不同，真实渗流面积是指流体所流过孔道的横截面的面积。图 1-11 为渗流断面的示意图，全部横断面的面积为渗流面积 A ，其中空白处

的面积为真实渗流面积 A_{ϕ} 。

真实渗流速度与渗流速度的关系为：

$$v = \phi \cdot v_{\phi} \quad (1-5)$$

式中 v —— 渗流速度， $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / \text{m}^2$ 。

三、压力的概念

油气藏内流体受到各种力的作用，作用力的大小往往用压力来表示，采用国际单位“帕”， Pa 。

外力作用的结果将引起地层及其内部流体能量的变化，这种变化通过压力的变化来反映，因此，从本质上说，压力是表示油藏能量及其变化的一个物理量。

下面介绍几种主要的压力概念。

1. 原始地层压力 p_i

油藏在投入开发以前测得的地层压力称为原始地层压力。

实测的原始地层压力一般是在打第一批探井时测得的，在油藏投入开发以后，因为地层的原始状态被打破，所以不可能通过实测得到油藏的原始地层压力，但可以通过其他各种方法间接得到对应深度的原始地层压力值。例如，可通过压力梯度曲线得到，如图 1-12，其中 H 为油层的深度。

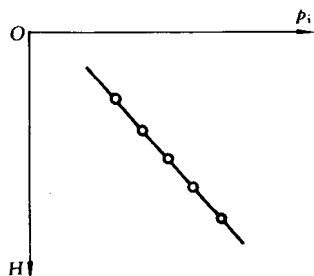


图 1-12 压力梯度曲线

压力梯度曲线是以第一批探井的原始地层压力与对应的地层深度作出的曲线，一般是一条直线。对于不同的水动力学系统，其压力梯度曲线是不同的，由此可以判断和区别不同的水动力学系统。

2. 目前地层压力 p_R

指油藏开发过程中，不同时期的地层压力，也称地层压力。

3. 边界压力 p_e

油藏边界处的压力称为边界压力。若边界处存在供源，则称此压力为供给压力；若边界是封闭的，则称此压力为封闭边界压力。

4. 井底压力 p_{wf}

在正常生产状态下，在生产井的井底测得的压力称为井底压力，也称为流压。一般指位于油层中部的压力值。

5. 折算压力 p_z

油藏中任一点的实测压力均与其埋藏深度有关，为了确切地表示地下的能量分布情况，必须把地层内各点的压力折算到同一水平面上，这个水平面称为折算平面，经折算后的压力称为折算压力，通常选取原始油水界面为折算平面。

折算压力计算如图 1-13，地层内任一点 M 的折算压力公式为：

$$p_{zM} = p_M + \rho g \Delta H_M \quad (1-6)$$

$$\Delta H_M = H_M - H_0 \quad (1-7)$$

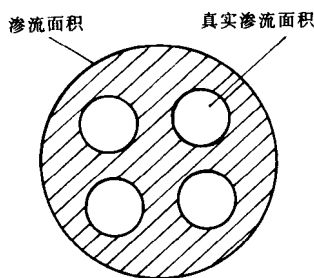


图 1-11 渗流横断面中渗流面积与真实渗流面积示意图

式中 p_{zM} ——M 点的折算压力, Pa;
 p_M ——M 点的实测压力, Pa;
 ΔH_M ——M 点到折算平面的距离, m;
 ρ ——流体密度, kg/m^3 ;
 g ——重力加速度, 9.8m/s^2 。
 H_M ——M 点的海拔高度, m;
 H_0 ——折算平面的海拔高度, m。

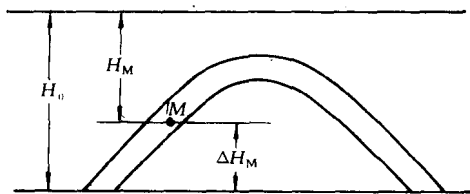


图 1-13 折算压力计算示意图

由式 (1-6) 可知, 折算压力不仅包含了油藏内流体的压能, 而且包含了位能。由于渗流速度很小, 流体的动能可以忽略, 所以, 折算压力在实质上代表了该点流体所具有的总的机械能。

例 1-1 如图 1-13 所示, 已知 M 点的压力 p_M 为 10MPa, 液体的密度 ρ 为 1g/cm^3 , M 点到折算平面的距离 ΔH_M 为 10m, 则 M 点的折算压力 p_{zM} 为多少?

$$\begin{aligned}\text{解: } p_{zM} &= p_M + \rho g \Delta H_M \\ &= 10 \times 10^6 + 10^3 \times 9.8 \times 10 \\ &= 10.098 \times 10^6 \quad (\text{Pa}) \\ &= 10.098 \quad (\text{MPa})\end{aligned}$$

第三节 渗流过程中的力学分析及油藏驱动方式

一、力学分析

储集于油藏中的油、气、水, 之所以能在岩石孔道中渗流, 是由于受到了各种力的作用。对流体的渗流而言, 这些作用力中有的是动力, 有的是阻力。总起来可分为以下五方面的力。

1. 流体的重力

地球对流体的吸引力称为该流体的重力。重力对于渗流有时表现为动力, 如邻近液体的重力一般表现为推动其前面流体运动的动力; 但有时也表现为阻力, 如图 1-14。

2. 惯性力

惯性是物体本身所固有的一种物理属性, 由于惯性而表现出来的力称惯性力, 其大小取决于质量和运动加速度。当流体运动时, 如果速度大或速度方向发生改变, 则表现出惯性力的作用, 因而对渗流而言, 惯性力往往表现为阻力。有时, 当惯性力相对于其他的作用力很小时也可以忽略不计。

3. 粘滞力

粘滞力是流体流动时流动层之间产生的内摩擦力, 其大小与流体的粘度有关。粘滞力总是阻碍流体的流动, 故粘滞力是阻力。

4. 岩石及流体的弹性力

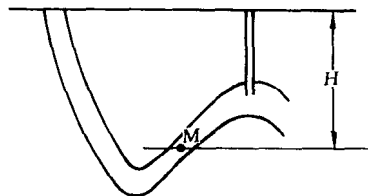


图 1-14 重力作用示意图

H —地层深度; M —油层位置

在油藏条件下的岩石和流体均处于被压缩状态。在开采过程，地层压力逐渐降低，导致岩石及流体发生膨胀，这种膨胀过程，就是释放弹性能的过程，即弹性力产生作用。弹性力的大小用弹性压缩系数表示。对于流体，弹性压缩系数是指每变化一个单位压力时，单位体积流体膨胀或被压缩的体积值；对于岩石，弹性压缩系数是指每变化一个单位压力时，单位体积岩石中的孔隙体积的变化值。

在渗流过程中，弹性力一般总是动力。一个油藏的弹性能大小，与油藏的总容积有关（包括含水区）。当油藏具有较大的含水区时，总的弹性能是相当可观的。当油藏的弹性力相对于其他作用力可以忽略不计时，油藏可被近似地看作是刚性的。

5. 毛细管压力

油藏的孔隙结构可视为由毛细管或微毛细管组成的结构，两相流体在毛细管中流动时，由于各相的内力不同，相界面会产生弯曲液面，而产生毛细管压力。毛细管压力的大小与界面张力及界面的曲率有关，毛细管压力的方向与岩石表面的润湿性有关，在水驱油的条件下，若岩石具有亲水性，则毛细管压力表现为动力，如图 1-15 (a)；若岩石具有亲油性，则毛细管压力为阻力，如图 1-15 (b)。

对于具体的一根毛细管，有时毛细管压力是很重要的，但从宏观角度看，一般毛细管压力不会是驱油的主要作用力。

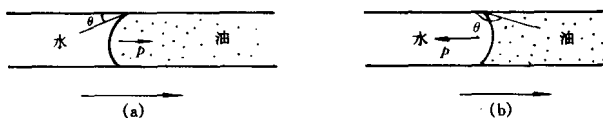


图 1-15 毛细管压力作用示意图

(a) 毛细管压力表现为动力；(b) 毛细管压力表现为阻力

二、油藏的驱动方式

如上所述，渗流过程的产生是由于各种力作用的结果。在油气开采过程中，流体将受到各种力中的一种主要力的作用，

这种主要的驱动力决定了油藏的驱动方式。油藏的驱动方式可分为以下五种。

1. 重力水压驱动

以与外界连通的水头压力或人工注水的压力作为主要驱动力的驱油方式称重力水压驱动方式。如果在开发过程中这种压力能维持不变，并且油藏内岩石及流体的弹性力都很小以至可以忽略不计，那么这时的重力水压驱动可称为刚性水压驱动。

2. 弹性驱动

以岩石及流体本身的弹性力作为主要驱动力的驱动方式称弹性驱动方式。如果油藏具有很大且连通性很好的含水区，这时弹性力将起到重要的作用。

3. 溶解气驱动

以从石油中不断分离出来的溶解气的弹性能作为主要驱动力的驱动方式称溶解气驱动方式。由于油中溶解的气是有限的，故这种驱动方式也常被认为是消耗性的开采方式，其采收率很低。

4. 气压驱动

若油藏内存在气顶，且主要依靠气顶压缩气体的弹性力作为主要驱动力的驱油方式称气压驱动方式。

5. 重力驱动

以流体的重力作用为主要驱动力的驱油方式称重力驱动方式。由于重力的作用很有限，故一般说，只是在其能量均已枯竭，且油藏具有明显的倾角时，才会出现这种驱动方式。

需要特别指出，油藏的驱动方式只反映了油藏中的主要驱动力，除此之外仍有可能存在

其他的驱动力；驱动方式并非一成不变，若主要驱动力发生改变，其驱动方式也随之改变。

第四节 线性渗流与非线性渗流

一、渗流的基本定律——达西定律

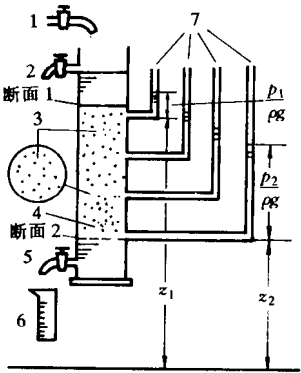


图 1-16 达西实验装置示意图

达西定律是在 1856 年由法国工程师达西通过实验而提出的，它是渗流力学的基本定律。

达西实验装置示意图如图 1-16。主要部分是一个直立的敞口圆筒，筒内由砂粒充填而构成多孔介质 3，筒的侧面装有一系列测压管 7，筒的底部放一滤网 4。水（或其他液体）由上部 1 引入，液体渗过砂层由底部出口流出，出口处有一阀门 5 控制其流量，流量大小可由量筒 6 测得。由溢流口 2 保持流动的稳态条件。在实验过程中不断地改变砂层的横截面积，以及砂粒的粒径，并采用不同粘度的牛顿液体进行。通过调节阀门 5 可得到不同流量和相应位置对应的水头。

在断面 1 处的总水头为 $H_1 = Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$ ，在断面 2 处的总水头为 $H_2 = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$ ，由于渗流速度很小，所以压力水头可近似为：

$$H_1 = Z_1 + \frac{p_1}{\rho g}$$

$$H_2 = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g}$$

将总水头换算成折算压力为：

$$p_{z_1} = p_1 + \rho g Z_1$$

$$p_{z_2} = p_2 + \rho g Z_2$$

实验结果表明，当流速在一定范围内变化时，其流量与其他量的关系为：

$$q = \frac{KA\Delta p_z}{\mu L} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 即为达西定律的一般表达式。公式采用国际单位制。

式中 K ——渗透率， m^2 ；

A ——砂层的横截面积， m^2 ；

Δp_z ——两个渗流截面间的折算压差（ $\Delta p_z = p_{z_1} - p_{z_2}$ ），Pa；

μ ——液体的粘度， $Pa \cdot s$ ；

L ——两个渗流截面间的距离，m。

若实验时砂层水平放置，则折算压差 Δp_z 为实测压差 Δp ，式 (1-8) 可改写为：

$$q = \frac{KA\Delta p}{\mu L} \quad (1-9)$$

由式 (1-9) 可知，流量 q 与压差 Δp 呈线性关系，故达西定律也称为线性渗流定律。