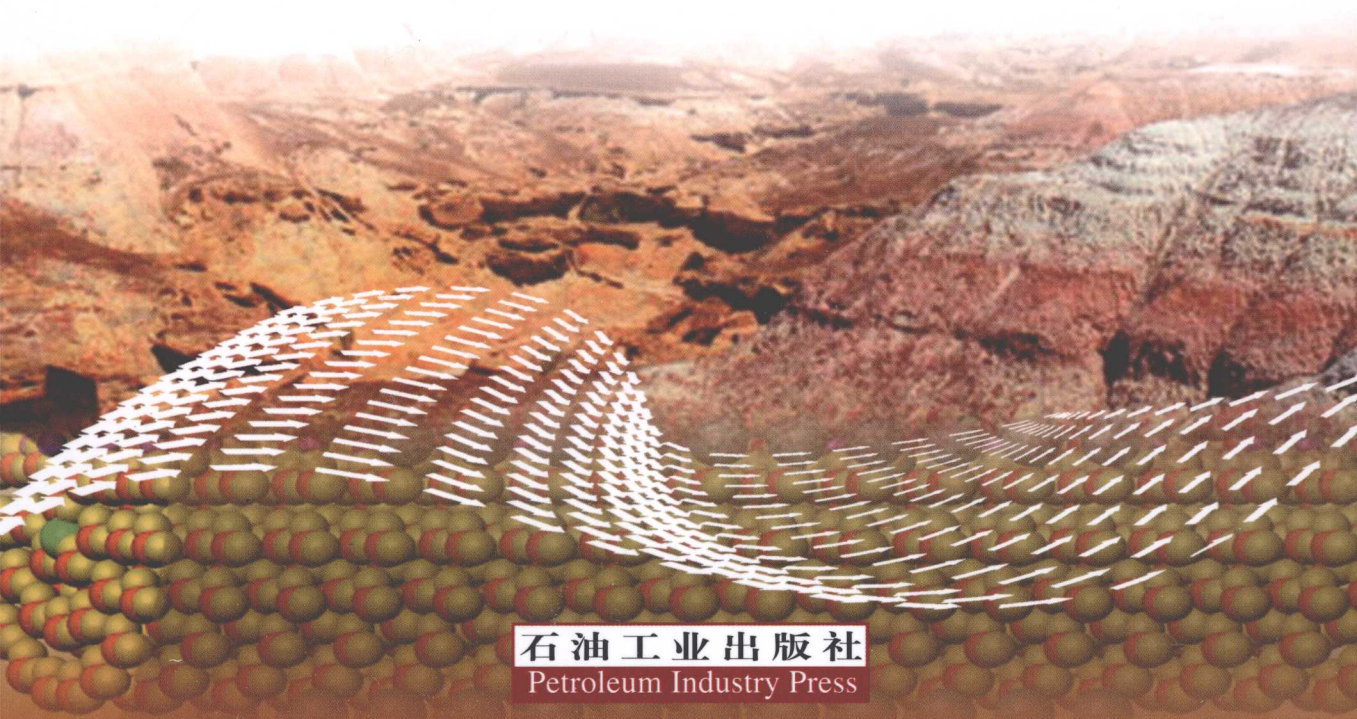




石油高等院校特色教材

油气渗流力学

李 滢 陈军斌 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油教材出版基金资助项目

石油高等院校特色教材

油气渗流力学

李 塍 陈军斌 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从驱动力和驱动方式出发,在对达西定律分析的基础上,遵循由浅入深的认识规律,详细介绍了单相不可压缩液体的稳定渗流理论、刚性水压驱动下的油井干扰理论、微可压缩流体的不稳定渗流理论、天然气的渗流规律、水驱油理论、油气两相渗流理论、流体在双重介质中的渗流理论、非牛顿液体渗流理论等。

本书可作为石油工程、石油地质、地下水工程、油田化学等专业本科生教材,也可作为相关专业研究生的参考书,还可供从事油气田勘探与开发的科研技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气渗流力学/李瑒,陈军斌编著.

北京:石油工业出版社,2009.11

石油高等院校特色教材

ISBN 978-7-5021-7462-0

I. 油…

II. ①李…②陈…

III. 油气藏渗流力学

IV. TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 189710 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523579 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:中国石油报社印刷厂

2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:12.5

字数:320 千字

定价:20.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

本书的前身是1991年在吴向红、叶继根同志协助下编印成的内部教材。2001年8月经陈军斌教授全面整理补充，定名《油气渗流力学基础》正式出版。一直作为教材在西安石油大学使用。遗憾的是在使用过程中发现各种重要错误近30处，小的错误就更多了，使我深感内疚，对不起读者。趁着这次重新出版的机会作了认真的修订，反复校对，删去了一些过时内容；补充了连续介质、低渗透非达西定律、多裂缝直井和多分支水平井、底水油藏直井和水平井产量的近似公式和运动与动力相似等内容。力求适合油气田开发工程发展的需要。

我国石油院校第一次开设渗流力学课程是在1955—1956年间，当时叫做地下水力学，用的教材是苏联B·H·谢尔加切夫教授和B·B·拉普克教授合著的《地下水力学》的中译本，译者就是已作古的在石油院校第一次讲授渗流力学的林平一教授，当时我为他担任助教。直到1966年，我国除了上述教材外，没有出版过任何一本渗流力学教科书。1982年，葛家理教授主编的教材《油气层渗流力学》问世；同年，陈钟祥、郎兆新教授翻译出版了作为苏联石油院校教学参考书的И·А·恰尔内教授的《地下水—气动力学》。接着刘恂宁教授、翟云芳教授、赵必华教授相继出版了他们编写的教材。2001年，郎兆新教授出版了专供研究生使用的《油气地下渗流力学》，渗流力学教学领域呈现出百花争艳的局面。

欧美有关渗流力学的教材更少，到今天为止，他们还把我们所说的“渗流力学”叫做“流体（油、气、水）通过多孔介质的流动”。我知道的第一本工程师培训教材是R·E·科林斯于1961年著的《流体通过多孔介质的流动》一书，但是直到1984年本书才有中译本。这本书虽先后被译成俄文、日文，但作为大学教科书是太深了。至于M. Muskat教授1939年著的《Flow of Homogeneous Fluid Through Porous media》确是渗流力学开山之作，但不适合作为教材。他的另一本经典之作《Physical Principle of Oil Production》出版于1949年，也不适合作为教材。前者迄今未有中译本，后者虽有中译本，但却是从俄文本转译过来的，俄译者在翻译成俄文时做了删节。西方写得最好，中译本译文最精彩的，印刷出版质量最高，错误最少的教材当属J. Bear教授著的《多孔介质流体动力学》一书，译者是李竞生等，中译本出版于1983年。这本书作为本科生的

教科书太深、太难了，似乎作为力学专业的教材更合适。此外它的内容几乎包含了渗流力学的各个方面，有关石油的内容只是其中的一部分。

编写一本适合石油工程专业大学生需要的渗流力学教材，既要结合石油勘探开发的需要，又要遵循渗流力学的科学体系；既不能使用超出石油专业教学大纲范围的教学工具，又不失严谨性，留有进一步提高的余地。最关键的是：要有符合渗流力学规律的严密体系，不是材料的胡乱堆砌；对理论概念、方法的解释既准确、科学，又有本人独到之处；内容既要简明扼要，又要符合大学生的认识规律，不仅照顾到科学体系的严整，还要说明其实用价值；既注重讲清楚有重大实用价值的公式、方法，更注意渗流力学一般研究方法的灌输；既照顾眼前的后续课程的需要，又指出将来进一步提高的方向。当然文字应尽量生动简洁，这是我们的努力目标，自知由于学识和文字水平所限，这本书离这个目标距离不小，还望广大读者批评指正。

我们愿意把这一本作者多年从事渗流力学教学与研究的心血结晶和青年学者辛勤劳作的成果献给从事采油工程和油藏工程工作的大学生们，也希望它能作为现场采油工程师、油藏工程师的进修备忘参考读物。

渗流力学是研究流体在多孔介质中运动规律的科学。只有掌握了油气水在油层中的运动规律，才能科学合理地开发好油气田。渗流力学是油藏工程、油藏管理、采油工程、试井和油藏数值模拟的基础，只有掌握了渗流力学才有可能学会学好上述课程。

渗流力学除研究油气层中的渗流以外，还广泛研究坝底渗流、土壤改良、化工、冶金、陶瓷等工业中的渗流问题。本书除了基本理论外，只涉及油气渗流，所以与石油无关的渗流力学问题本书都未做介绍。

感谢西安石油大学和石油工业出版社的支持，使得本书能在石油界出版发行。

吴鄂同志为本书提供了部分习题，薛中天、高承泰教授给我们提供了宝贵意见，在此一并致谢！

李 璠

2009年9月

目 录

第一章 渗流的基本规律	1
第一节 油气藏中的静态状况	1
第二节 油气藏中的驱动力和驱动方式	3
第三节 渗流的基本规律——达西定律	6
第四节 达西定律的局限性与非达西渗流	9
习 题	12
第二章 单相不可压缩液体的稳定渗流	13
第一节 三种基本渗流方式	13
第二节 单相不可压缩液体的平面一维稳定渗流	14
第三节 单相不可压缩液体的平面径向稳定渗流	18
第四节 油井的不完善性	22
第五节 稳定试井	24
第六节 单相流体渗流的微分方程	25
习 题	32
第三章 刚性水压驱动下的油井干扰理论	34
第一节 井间干扰现象	34
第二节 势的叠加原理	35
第三节 镜像反映法	38
第四节 复变函数理论在平面渗流场中的应用	53
习 题	70
第四章 微可压缩液体的不稳定渗流	72
第一节 弹性液体向井渗流的物理过程	72
第二节 半无限大地层平面一维不稳定渗流	73
第三节 弹性液体向一口井稳定渗流的压力传导规律	76
第四节 有限封闭弹性地层内液体向井渗流压力变化的近似解	80
第五节 弹性不稳定渗流的多井干扰	83
第六节 不稳定试井分析	87
习 题	92
第五章 天然气的渗流规律	94
第一节 天然气的性质及其渗流的基本微分方程	94
第二节 气体的稳定渗流	99
第三节 气体的不稳定渗流	103
习 题	105
第六章 水驱油理论基础	107
第一节 活塞式水驱油	107

第二节	底水锥进	112
第三节	非活塞式水驱油理论基础	126
习 题		136
第七章	油气两相渗流理论 (溶解气驱)	138
第一节	油气两相渗流的基本微分方程	138
第二节	油气两相稳定渗流	140
第三节	混气液体的不稳定渗流	145
习 题		148
第八章	双重介质中的渗流	149
第一节	双重介质中的渗流特征	149
第二节	双重介质中单相微可压缩液体的基本渗流方程	150
第三节	无限大双重介质地层中的压力分布	152
第四节	双重介质中的油水两相渗流	154
第五节	在纯裂缝地层中液体的渗流	158
习 题		160
第九章	非牛顿液体的渗流	161
第一节	非牛顿液体的力学特性与类型	161
第二节	非牛顿幂律液体的渗流	164
习 题		170
第十章	相似理论	171
第一节	相似性的概念	171
第二节	运动和动力相似	171
第三节	标配模型和相似定律	173
第四节	已知物理系统方程时的量纲分析举例	174
第五节	比拟模型的举例	178
第六节	标配模型中的部分相似性	180
第七节	多孔介质模型标配的特殊方面	181
习 题		182
附录		183
附录一	柱坐标形式的渗流方程	183
附录二	用拉氏变换求液体作平面一维不稳定渗流的解	185
附录三	误差函数 $\text{erf}(x)$ 计算程序	186
附录四	指数积分函数 $\text{Ei}(-x)$ 计算程序	187
附录五	$\Gamma(x)$ 函数计算程序	188
附录六	油气藏工程常用单位之间的换算关系	189
附录七	油气藏工程常用计量单位的中、英文名称对照表	192
附录八		193
参考文献		194

第一章 渗流的基本规律

流体（液体、气体及其混合物）在多孔介质中的流动叫渗流。含有孔隙的固体或固体集合叫做多孔介质。大的孔隙叫洞，直径从2mm到几十米；直径为微米级的叫孔隙，至于局部把固体分割成互不接触的部分的裂缝，其宽度的变化范围很宽，而连接孔隙空间的喉道就比较窄了。不管是洞、裂缝还是孔隙，目前在国际国内都没有严格的定义。常见的砂岩、石灰岩、白云岩储集层是多孔介质；不常见的含裂缝的泥岩、火成岩和变质岩储集层也是多孔介质。油气田开发过程就是油气水从储集层流向井底，再从井底采到地面的过程。只有掌握了油气水及其混合物的渗流规律，才能迅速有效地、尽可能多地把储集层中的油气采出来。油气渗流力学就是研究油气水及其混合物在储集层中运动规律的科学。

砂岩储集层的孔隙多是粒间孔隙，相对于裂缝来说分布比较均匀。泥岩、火成岩和变质岩储集层则属裂缝储集层，而裂缝分布的随机性很大。砂岩称为孔隙介质；而带裂缝的泥岩、火成岩和变质岩称为裂缝介质。石灰岩、白云岩以及部分砂岩既有孔隙又有裂缝则称为双重介质。在我国，以上几种类型的岩石是有工业价值的油气藏的主要储集层。

按照我国现行的有关专业的教学计划，多孔介质中的流体静力学、流体及多孔介质的性质是在油气藏物理学中讲授的。为了更紧密地结合石油工程专业的需要，而又不失一般性，本章先从油气水在油气藏中的静态分布讲起，然后介绍各种驱油动力，着重讲授有关的概念。在此基础上介绍渗流的基本定律——达西定律，然后用它来分析各种各样的实际问题。

第一节 油气藏中的静态状况

一、油气水的分布状况

大多数油气藏在未开发以前，处于相对平衡状态，储集层中的油气水分布与储集层的岩石性质、流体性质有关。如果在储集层中同时存在油气水，由于气体最轻，将占据构造的顶部，称为气顶；石油则聚集在稍低的翼部；而密度更大的水则位于油的下部，如图1-1所示。

油气藏中油和水的接触面称为油水界面，投影到水平面上即为含油边缘。严格来说，含油边缘应划分为含油内缘和含油外缘。实际上，一般取两者的平均值作为含油边缘。油气界面与储集层顶面的交线称含气边缘。如果油气藏外围与天然水源相连通，可向油气藏供液，称为开敞式油气藏，外廓的投影称为供给边缘（图1-1）。如果外围封闭且边缘高程与油水界面高程一致，则称为封闭式油气藏，其外廓称为封闭边缘（图1-2）。

根据油气水分布状况，把位于含油边缘外部的水称为边水；若油层厚度大或构造比较平缓，致使水位于原油之下，这样的水称为底水。

实际油田中，很少有单一油层的油气藏，而往往是多层油气藏，层与层之间岩性也经常不一致，油水、油气界面可能各层都不一样。因此，在开发油田时，首先应了解油气水的分布状况及特点。

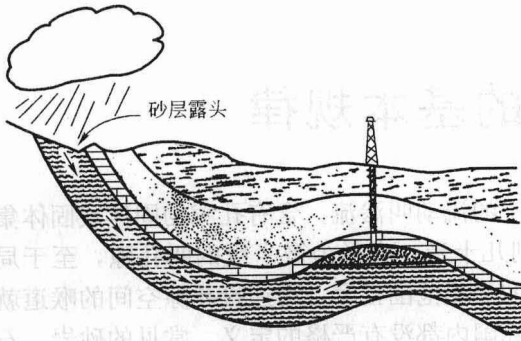


图 1-1 有供水区的油气藏

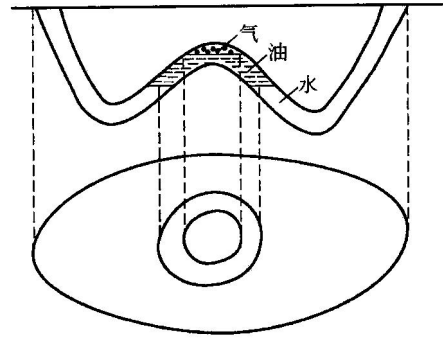


图 1-2 油、气边缘

二、各种压力概念

压力是地层能量大小的反映，知道了油气藏的压力场就等于知道了油层中的流体流动状态。在油田开发过程中，经常会遇到不同的压力概念，以下将介绍其中的主要几种。

1. 原始地层压力 p_i

油层压力指油层中部的孔隙内的流体压力。油气藏在开发以前，一般处于平衡状态，此时油层中的流体所承受的压力称为原始地层压力。当油层倾角较大时，各井的油层中部深度往往各不相同，处于构造顶部的井，油层中部深度小，而处于翼部的井，油层中部深度大，油气藏在投入开发以前，油层中任一点 M 的总能量（或称总水头） $H = Z + p / (\rho g)$ 为一常数，如图 1-3 所示。其中， OO' 为基准面，一般选原始油水界面为基准面； Z 为离基准面的高度； ρ 为流体密度； p 为 M 点的压力， g 为重力加速度。

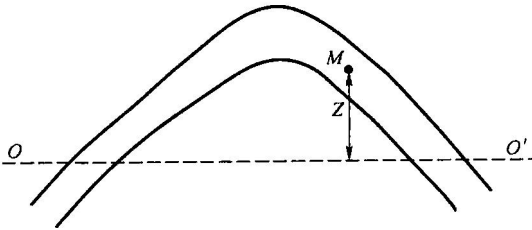


图 1-3 折算压力图

各井原始地层压力是不相等的。应当在第一口探井见到工业油流后，关井测其稳定的地层压力，以后每一口探井在试油开始就要测压，所测得的各油井油层中部的压力就是该井原始地层压力。

严格地讲，油气藏中只要有一口井生产过，原始的平衡状态就遭到破坏，以后就不可能再测得原始地层压力。如果压力计不能下到油层中部，则需根据所测得的压力梯度进行折算。显然，压力计应尽可能下到油层中部，以提高测量精度。

2. 目前地层压力 p

油气藏在开发过程中，使某一油井停止生产而周围其他油井继续稳定生产，则关闭井的井底压力逐渐升高，经过较长时间后，压力不再上升，趋于稳定，此时测得的该油井油层中部深度的实测压力称为目前地层压力，习惯上也称为静止压力，简称静压。

3. 供给压力 p_e

油气藏中存在液源供给区时，在供给边缘上的压力称为供给压力，用 p_e 表示。

4. 井底压力 p_w

油井在生产过程中所测得的井底油层中部的压力称为井底压力，也常称为流动压力，简

称流压，用 p_w 表示。

5. 折算压力 p_r

由流体力学知道，油气藏中流体除具有压能以外，还具有位能，如果处于运动状态，还有动能。对于如图 1-3 所示的油气藏中的任一点 M ，单位质量流体所具有的总能量为

$$H = Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$$

式中， v 为 M 点流体的运动速度。当然，对于原始状态， $v=0$ 。

由于流体在油层中渗流时，在孔隙通道中的流速是很小的，数量级为 10^{-7} m/s，而它的平方项与静水头比更小，可忽略不计，这样，总能量可以写成

$$H = Z + \frac{p}{\rho g}$$

将总能量用压力的形式表示，则有

$$p_r = \rho g H = p + \rho g Z$$

式中， p_r 称为 M 点的折算压力，它表示 M 点的流体所具有的总能量，而 p 仅表示压能的大小。

在油气藏投入开发以前，各井点折算到原始油水界面的压力都应相等。投入开发后，流体由折算压力高处流向折算压力低处。由于储集层的隆起幅度一般远低于它的横向延伸，为了分析方便，常将三维渗流简化为平面渗流问题，这样也必须使用折算压力概念，今后在研究全油气藏中的渗流问题时，如果不加说明，所有的压力都是折算压力。

例 1-1 某井油层中部海拔 -940m，油水界面海拔 -1200m，地层原油密度 800 kg/m^3 ；实测油井的油层中部压力为 12.5 MPa ，求原始油水界面处的折算压力。

解：该油井油层中部标高为： $Z=1200-940=260(\text{m})$

$$\begin{aligned} p_r &= p + \rho g Z \\ &= 12.5 + 800 \times 9.81 \times 260 \times 10^{-6} \\ &= 14.54(\text{MPa}) \end{aligned}$$

在油井动态分析中，需要对比各井的地层压力，此时也必须使用折算压力才能得出正确的结论。

第二节 油气藏中的驱动力和驱动方式

在油气藏中钻了一口井，当降低井底压力时，原油就会经油层流到井底。那么，原油是靠什么能量在油层中流动的呢？归纳起来主要有以下几种。

一、静水压力

当油气层周围存在与含油气区连通的供水区时，供水区的静水压力就是驱动力，只要井底压力低于供水区压力就会产生流动，供水充足时，可以认为油水界面上的压力保持不变，如果油水界面深度为 H （图 1-4），则油水界面上的静水压力为

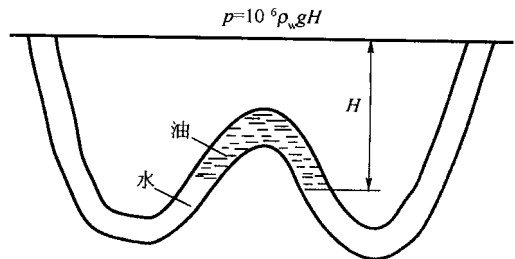


图 1-4 油水界面上的压力

$$p = 10^{-6} \rho_w g H$$

式中 ρ_w ——水的密度, kg/m^3 ;
 g ——重力加速度, m/s^2 ;
 H ——油水界面深度, m ;
 p ——油水界面上的压力, MPa 。

这种靠供水区的静水压力驱油称为水压驱动。对于多数油气藏, 供水量总是少于采油量的。除了少数小油气藏外, 在整个开发阶段, 都是天然水驱的油气藏很少见, 人工注水是主要开发方式, 我国多数油气藏都是靠注水开发的。

二、地层及其中所含流体的弹性能

地层中的原油长期处在原始地层压力下, 当油井投产以后, 由于油层压力下降, 油层中原来受压缩的液体就会膨胀, 从而将部分石油驱向井底。

表征流体弹性能大小的物理量是流体的压缩系数 C_L , 它是体积弹性模量的倒数, 表示改变单位压力时的流体体积的相对变化量, 用公式表示为

$$C_L = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \quad (1-1)$$

式中的 V 为流体的体积, 由于流体体积 V 是随压力 p 增加而减小的递减函数, 所以其导数为负值, 为了使 C_L 值为正, 前面需加负号, 又因为流体体积也是温度 T 的函数, 记作 $V(p, T)$, 所以上述公式中会出现偏导数, 即 C_L 为等温压缩系数。

通常在开发过程中, 油气藏的温度变化不大, 一般不考虑温度对液体体积的影响, 在油气藏压力变化范围内可以认为水的压缩系数为常数, 其值大约为 $(3.7 \sim 5) \times 10^{-3} \text{MPa}^{-1}$, 而油的压缩系数与原油中所溶解的天然气的量有关, 且变化范围较大, 其值一般为 $(7 \sim 140) \times 10^{-3} \text{MPa}^{-1}$, 而气体的压缩系数变化范围更大, 不能视作与压力无关的常数。当油层温度为常数时, 式 (1-1) 简化为

$$C_L = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-2)$$

当流体的压缩系数变化较小, 可以近似当作常数时, 该公式还可以用下列差分形式表示

$$C_L = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-3)$$

如果引入原油的体积系数 B_o , 则由式 (1-2) 可导出原油的另一个压缩系数 C_o 的表达式

$$C_o = -\frac{1}{B_o} \frac{dB_o}{dp} \quad (p > p_b) \quad (1-4)$$

或
$$C_o = \frac{1}{B_o} \frac{dB_o}{dp} \quad (p < p_b) \quad (1-4')$$

这是因为当地层压力低于饱和压力时, 体积系数是压力的增函数, 前面不要负号, 地层压力高于饱和压力时则仍需加负号。

同样岩石颗粒处于地层压力均匀压缩之下, 地层压力下降时, 岩石颗粒体积也会有所膨胀, 但固体压缩系数很小, 与液体、气体的压缩性比可以忽略不计。储集层深埋地下, 承受着上覆岩层的作用力 F , 这一岩石压力为岩石骨架的应力 σ_m 乘以储集层与盖层的接触面积 A_m 和地层压力 (储集层孔隙中流体的静水压力) p 乘以孔隙截面积 A_p 所平衡, 即

$$F = \sigma_m A_m + p A_p$$

采油过程中，地层压力 p 必然会下降，特别是井底周围，下降得更多。由于上覆岩层的作用力 F 是一个常数，岩石骨架所受的应力必然会增加，于是引起它的变形，结果造成孔隙体积的减小，孔隙度和渗透率降低。图 1-5 就是岩石骨架变形图。

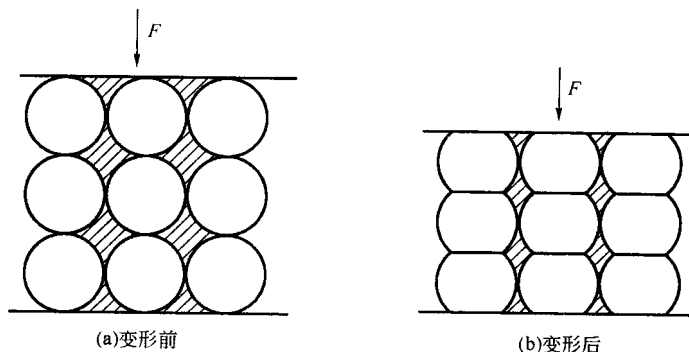


图 1-5 岩石骨架变形图

如果注水压力升高，岩石骨架所受应力减小，岩石骨架又会复原，使孔隙体积增加。实际上这一过程是不可逆的，岩石骨架应力增加将引起塑性变形，如胶结结构的破坏，在压力恢复后是不能复原的。为了简化，在油层深度不大时，可以认为过程是可逆的，即弹性的，这样做实际上误差不大。油层深度超过 4000m 或异常高压层的孔隙度和渗透率随压力变化就不容忽视。低渗油气田开发经验证明，低渗油气田的渗透率随压力变化比较显著，而这一问题是不容忽视的。

由以上分析得知，地层压力减小，孔隙体积 V_p 减小，地层压力增加，孔隙体积 V_p 增加，所以地层孔隙压缩系数（或简称为地层压缩系数） C_f 定义为

$$C_f = \frac{1}{V_p} \frac{\partial V_p}{\partial p} \quad (1-5)$$

假设渗流过程是等温的，则可以将偏导数写成全导数形式。在苏联文献中，用岩石的表观体积 V 作分母来定义地层的压缩系数 β_n ，即

$$\beta_n = \frac{1}{V} \frac{dV_p}{dp}$$

若地层的孔隙度为 ϕ ，则有 $V_p = \phi V$ ，于是有

$$\beta_n = \phi C_f$$

在阅读前苏联文献和欧美文献时，应注意这一差别。我国采用公式 (1-5) 作为地层孔隙压缩系数的定义。

实际油田往往油水两相或油气水三相并存，这时还可以引入一个流体与岩石的总压缩系数 C_t 。它表示地层压力下降一个单位从单位孔隙体积中依靠油气水的膨胀以及孔隙体积的减小所驱出的流体总量，当油气藏中油气水的饱和度分别为 S_o 、 S_g 和 S_w 时，则有

$$C_t = C_f + C_o S_o + C_w S_w + C_g S_g \quad (1-6)$$

式中， C_o 、 C_g 和 C_w 分别为油气水的压缩系数。

油气靠地层及本身的弹性由储集层流向井底叫弹性驱动，一般弹性作为驱动力在整个开发过程中所占比例不超过 10%，但在整个采油过程中一直存在，特别是油井的工作制度变化的时候。

三、溶解气的弹性能

一般地层原油中都溶有大量的天然气，当地层压力降到饱和压力以下时，原先溶解的天然气从原油中逸出成为自由气，自由气的弹性膨胀会把油从地层驱向井底，没有其他驱动能量，仅依靠分离出的溶解气驱油的驱动方式，叫溶解气驱，溶解气驱和弹性驱的驱油能量是均匀分布在油气藏中的，它们与来自外边界的靠静水压力驱动的能量不同。

四、气顶的弹性能

对于存在气顶的饱和油气藏，油井投产后，地层压力的下降必然会引起气顶压力的下降，从而导致气顶中的天然气膨胀驱动原油流向井底，显然气顶驱必然伴随着溶解气驱。

五、重力作用

油自然也会从构造高部位流向构造低部位，自油层顶部流向底部，当没有其他驱油能量时，油本身的重力也是一种驱动力。

以上所列举的是几种常见的驱动能量。对于某一具体的油气藏，可以同时存在几种驱动力，但是在不同的生产阶段，其中必有一种能量起着主导作用，而其他能量（动力）则处于次要地位。在生产过程中主要依靠哪一种能量来驱油，称为油气藏的驱动方式，因此，根据以上几种不同的驱动能量，可以将驱动方式划分为水压驱动、弹性驱动、溶解气驱动、气顶驱动和重力驱动。

然而驱动方式并非一成不变的，在一定条件下可以由一种驱动方式转化成另一种驱动方式。例如：如果所采用的开采方式不合理，油气藏周围虽然存在较大的供水区，但由于油气藏内部产油量过大，使边水能量的补充远跟不上油气藏内能量的消耗，在油气藏的局部地区压力迅速下降，低于饱和压力，则此局部地区就由高效率的水压驱动转化成低效率的溶解气驱动。反之，如果油气藏周围没有天然供给区，只要我们采取人工注水的方法，就可以使弹性驱动或溶解气驱动转化为高效率的水压驱动。

驱动方式不同，渗流机理就不同，渗流过程也不同，有时甚至连参加渗流的流体都不一样。为了能迅速有效地开发油气藏，必须研究不同驱动方式下的渗流规律，以指导油田开发实践。

毫无疑问，油在地层中运动还必须克服阻力。由于孔隙结构复杂，孔道细且极不均匀，孔道表面异常粗糙，因此渗流阻力主要是粘滞阻力，但由惯性产生的局部损失也是存在的，多相流动时贾敏效应还会产生附加阻力损失。

第三节 渗流的基本规律——达西定律

一、连续介质

所有物体都是由分子组成的，分子无时不在运动之中，尽管外观是静止的。严格讲来物体都是不连续的，虽然理论上说知道初始状态和力矩就可以预测分子运动的规律，实际研究三个以上分子的运动已经够麻烦了。一般不可能从分子水平来研究流体的运动规律。

本书关心的是许多分子的集合体，研究这个集合体的运动。所有表征流体运动的特性

(例如速度)都是这个集合体内各分子的平均值。以这一集合体为基本单元,就可以认为流体是连续的了。这个基本单元就叫质点,然而它不是数学点。质点必须足够小才能充分反映出流动特性;其次它又必须包括足够多的分子,以保证平均值的稳定。所谓一点处的密度 ρ ,用公式表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

式中 ΔV ——围绕某点的体积, m^3 ;

Δm —— ΔV 内所包含流体的质量, kg 。

按照连续介质理论 $\Delta V \rightarrow 0$, 就是趋近一个质点, 而质点内有足够多的分子, 不是数学意义上的无穷小。研究流体运动不是从分子水平出发, 而是连续介质的质点出发, 这就叫微观水平。

渗流是流体在多孔介质内的运动。多孔介质既包括固体也包括孔隙。所以多孔介质的一个质点必须包含有足够多的固体及孔隙, 可以想象多孔介质的质点比流体或固体的质点大。所谓多孔介质一点处的性质(例如压力、速度)就是这个质点内的平均值, 由于多孔介质结构的极端复杂性, 渗流力学多数情况下研究的是宏观现象, 即质点参数的平均值, 较少涉及微观机理。

二、达西定律

假设多孔介质是由等直径的球形颗粒组成, 其半径为岩石粒度分析得出的平均值, 根据球形颗粒堆积研究的结果, 多孔介质的孔隙度与颗粒大小无关, 仅与球形颗粒的排列方式有关。当四个球心成菱形排列时孔隙度最小, 为 0.259, 而哪一种稳定装填方式孔隙度最大, 至今尚未发现, 已发现稳定排列的最大孔隙度为 0.875。

实际岩石颗粒形状不是球形, 除了颗粒之外还有胶结物。很难用球形颗粒模型来说明实际问题。世界各国的油气藏的最小孔隙度都小于 0.259。到目前为止, 还没有发现有效的简化多孔介质的方法。

宏观世界纷繁的力学现象, 复杂的运动过程无不遵守牛顿定律。渗流的形式、渗流的流体尽管千差万别, 也应具有共性。这一共性就是渗流的基本定律, 研究渗流力学就是在这一共性指导下去研究每一种渗流方式的特性——适应某一具体情况特殊渗流规律。

渗流的本质是实际流体流过多孔介质的流动, 根据孔隙直径很小, 渗流时流体与孔隙表面接触面很大这一特性推断, 粘滞损失是主要的。因此, 若粘度为 μ 的液体以流量 q 通过截面积为 A 、长度为 L 的地层产生的压力降为 Δp , 易知

$$q \propto \frac{A \Delta p}{\mu L}$$

如果写成等式则为

$$q = \frac{KA \Delta p}{\mu L} \quad (1-7)$$

这就是达西定律, 1856 年法国工程师达西通过实验证明了这一规律。达西做了一个约 1m 高的直立铁桶, 内装松散的砂子, 两端用滤网封住, 在砂桶的上下两端装上测压管, 水自上向下流(图 1-6), 他发现不管流量如何变化, 渗流速度 v 与水力坡度成正比。

$$v = K_s \frac{h_1 - h_2}{L} = K_s \frac{\Delta h}{L}$$

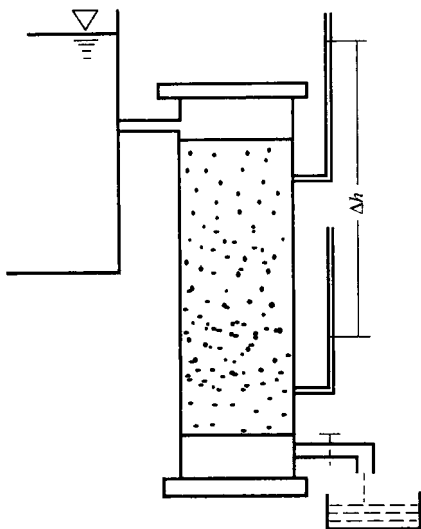


图 1-6 达西实验流程图

式中 v ——渗流速度，它等于流量除以砂柱的横截面积，m/s；

Δh ——测压管内水柱高差，m；

L ——砂柱长度，m；

K_s ——渗流系数，m。

不改变装砂类型，只改变渗流系数 K_s ，速度与水力坡度关系不变。当时达西关心的只是水，所以使用水力坡度而不用压力梯度。而对于每一种砂子，水的渗流系数是一常数。这个形式的达西定律对于研究水的渗流非常方便，至今仍在地下水渗流力学中广泛使用。要研究油气水及其混合物在地层中运动使用水力坡度和渗流系数就不方便了，不如使用压力梯度和剔除液体性质影响的渗流系数，明显可以看出

$$K_s = K \frac{\rho g}{\mu}$$

式中，比例系数 K 叫做渗透率，完全取决于多孔介质性质，与流体性质无关，于是达西定律就变为

$$v = \frac{K \Delta p}{\mu L} \quad (1-8)$$

和推测的结果一样，之后很多人重复了达西试验，砂桶无论是垂直还是倾斜放置，压力差都应是考虑了位置头的折算压力。

三、渗流速度与平均真实渗流速度

根据达西定律，渗流速度 v 为

$$v = q/A = \frac{K \Delta p}{\mu L}$$

它表示通过单位岩石截面积的流量。然而，渗流速度并不是流体质点在孔隙中的真实速度，因为岩石的任一截面上既有能通过流体的孔隙断面，也有不能为流体所通过的固体颗粒部分。任取岩心的一个截面，设该截面的孔隙面积为 A_p ，则有

$$n = \frac{A_p}{A}$$

式中， n 称为该截面的透光度，也叫面孔隙度。显然任一截面上的平均真实渗流速度应为

$$v_t = \frac{q}{A_p} = \frac{q}{nA}$$

由于岩层的非均质性，即使岩石各截面的面积 A 保持不变，但各截面上的孔隙面积是不相同的，透光度也不相等，因而平均真实渗流速度也不相同。为了便于研究，取沿流程透光度的平均值 \bar{n} 来确定流体的平均真实渗流速度，即

$$v_t = \frac{q}{\bar{n}A}$$

$$\bar{n} = \frac{1}{L} \int_0^L n dx$$

而岩石的孔隙体积 V_p 可以表示成

$$V_p = \int_0^L An dx = AL \left(\frac{1}{L} \int_0^L n dx \right) = AnL$$

根据孔隙度的定义有 $\bar{n} = \phi$ ，所以沿流程 L 流体的平均真实渗流速度公式为

$$v_t = \frac{q}{\phi A} = \frac{v}{\phi} \quad (1-9)$$

显然，流体的平均真实渗流速度比渗流速度大。

达西定律是在等截面均质砂层中用均质液体作稳定渗流的实验基础上得到的。一般情况下，渗流的过水断面是变化的，地层不仅不是均质的，还是各向异性的，流体性质有时也随位置而变化，本书认为：达西定律在微元体上成立，一般写成

$$\bar{v} = -\frac{K}{\mu} \text{grad}(p + \rho g z) = -\frac{K}{\mu} \nabla(p + \rho g z)$$

将该速度分解成沿 x 、 y 、 z 方向上的三个分速度，则有

$$v_x = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial}{\partial x}(p + \rho g z); v_y = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial}{\partial y}(p + \rho g z); v_z = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial}{\partial z}(p + \rho g z)$$

上式右边的负号是因为渗流速度的方向总是与压力梯度的方向相反，即渗流速度总是沿着压力下降的方向。需要注意的是：此微元体内必须既包含有足够多的砂粒又包含足够多的流体，如果真的认为微元体是无穷小，则可能其中只包含固体颗粒，或流体质点，就不是渗流了，这就是达西定律的统计性。

四、渗透率的量纲

渗透率是油层重要的物理性质，直接与井的产能有关，是油气藏评价、油气田开发的重要的参数之一。利用公式 (1-7)，根据量纲一致原理得知，渗透率的量纲为

$$[K] = \frac{[\mu][L][q]}{[A][\Delta p]} \quad (1-10)$$

取质量 M 、时间 T 和长度 L 为三个基本量纲，则上式右端各变量的量纲为

$$[q] = L^3/T; [\mu] = \frac{M}{TL}; \Delta p = \frac{M}{T^2L}$$

代入式 (1-10) 后得

$$[K] = \frac{M}{TL} L \frac{L^3/T}{L^2 \cdot M/T^2L} = L^2$$

由此可见，渗透率 K 具有面积的量纲，因为它表示多孔介质允许流体通过的能力，有面积量纲是顺理成章的。在 SI 制中面积的单位是 m^2 ，对于油层渗透率来说显然太大了。因此，在油气藏工程 SI 制中常用微米的二次方 (μm^2) 作为渗透率 K 的单位。

例如，设粘度为 $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的液体通过长度为 1 cm 截面积为 1 cm^2 两端压差为 10^5 Pa 的岩样，若流量为 $1 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，则该岩样的渗透率为

$$K = \frac{q\mu L}{A\Delta p} = \frac{10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} \times 10^{-2} \text{ m}}{10^{-4} \text{ m}^2 \times 10^5 \text{ Pa}} = 10^{-12} \text{ m}^2 = 1 \mu\text{m}^2$$

第四节 达西定律的局限性与非达西渗流

达西定律表示压力损失完全由粘滞阻力所决定，这是符合多孔介质比面大这一特点的。液体与固体的接触面大，粘滞损失大，因而，在多数情况下是服从达西定律的。但是多孔介

质的第二个特点是孔道直径变化大，分支、合并、拐弯多，因此惯性损失（局部损失）大。粘滞损失与速度成正比，而惯性损失与速度的平方成正比，当渗流速度较小时， $v \gg v^2$ ，惯性损失可以忽略不计，当速度较大时，就不能再忽略惯性损失了。所以，随着渗流速度的增大达西定律就会失效。

达西定律失效并不是说多孔介质中发生了紊流，因为多孔介质的孔道直径太小，发生紊流的可能性极少。事实上，达西定律失效主要是由于层流条件下惯性损失大所致，实验也证实了这一点。

在流体力学中，判断液体流动的流态的准数是雷诺数 Re ，在研究流体在多孔介质中渗流是否服从达西定律时，也采用雷诺数 Re （粘性力与惯性力的比值）这一准数，当雷诺数达到一定值以后，达西定律失效。由流体力学知识可知：

$$Re = \frac{\rho d v_t}{\mu} \quad (1-11)$$

式中 ρ ——液体的密度， kg/m^3 ；
 μ ——液体的粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；
 d ——多孔介质孔道的水力直径， m ；
 v_t ——液体渗流的真实速度， m/s 。

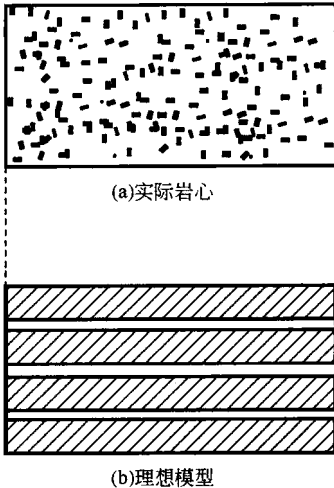


图 1-7 岩心和理想模型

尽管有了上述公式，然而，由于渗流的孔道极不规则，甚至连孔道直径都难于给以准确定义。直接测量孔道直径是非常困难的，通常采用一个理想模型来求孔道的平均直径。理想模型是对实际岩心的最简单的模拟，与实际相差甚远。如图 1-7 所示，(a) 为实际岩心；(b) 为理想模型，并假设：(1) 实际岩心与理想模型的几何尺寸相同。(2) 理想模型由一簇等直径的毛细管所组成，且理想模型与实际岩心的孔隙体积相等。(3) 在相同的压差作用下，通过实际岩心与理想模型的液体流量相等。满足以上条件的理想模型的毛细管直径 d 就是地层孔道的等效平均直径。

在层流条件下通过单根毛细管的流量为

$$q' = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \mu L}$$

式中， r 为毛细管半径，设多孔介质单位截面上有 N 根毛细管，则毛细管总数 NA ，通过理想模型的总流量为

$$q = NAq' = \frac{NA \pi r^4 \Delta p}{8 \mu L} \quad (1-12)$$

又由理想模型与实际岩心的孔隙体积相等，得

$$NA \pi r^2 L = \phi AL$$

简化得

$$N = \frac{\phi}{\pi r^2}$$

将上式代入式 (1-12) 中，得

$$q = \frac{\phi A r^2 \Delta p}{8 \mu L} \quad (1-13)$$