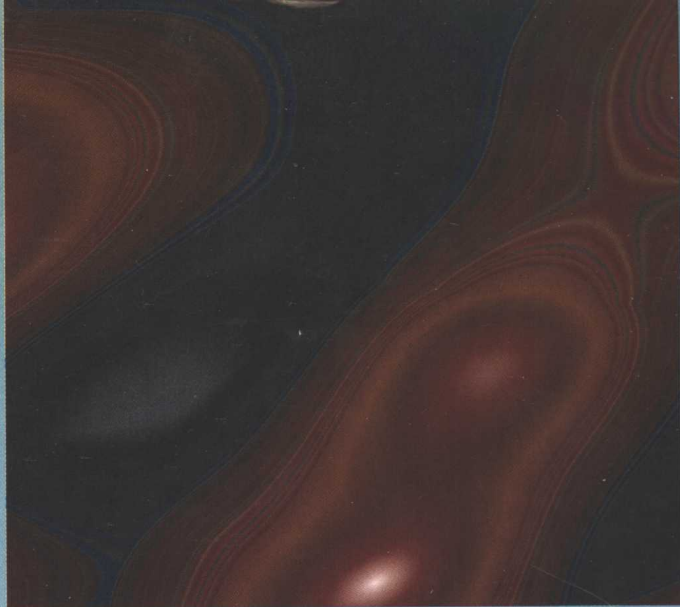




油气层渗流力学

主编 张建国 雷光伦 张艳玉

石油大学出版社



油 气 层 渗 流 力 学

主编 张建国 雷光伦 张艳玉

石油大学出版社

油气层渗流力学

主编 张建国 雷光伦 张艳玉

石油大学出版社出版发行

(山东省东营市)

新华书店经销

山东省东营市石油大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 15 印张 384 千字

1998 年 4 月第 1 版 2002 年 6 月第 3 次印刷

印数 3001~4500 册

ISBN 7-5636-1103-7/TE · 212

定价:17.00 元

前 言

本书是为石油高校石油工程专业学生所编写的油气层渗流力学教材,以研究油、气、水在地下多孔介质中的运动形态和规律为对象,对其他有关专业可根据不同教学学时的安排等具体情况对所讲授内容作酌情选取。

本教材由石油大学油藏工程教研室张建国、雷光伦、张艳玉等同志在多年教学实践基础上,以原石油大学所使用的渗流力学教材为基础并参考葛家理、刘尉宁等先生所编写的渗流力学以及其他国内外有关地下渗流力学资料,为适应新的教学形势的改革需要而编写,在此一并表示感谢。

本书较系统地介绍了油气层渗流力学的基本规律以及研究渗流力学的基本方法,所以本书也可作为从事油藏工程方面工作的技术人员的参考书。

由于编者水平所限,编写时间仓促,书中可能存在不少缺点和不当之处,敬请读者提出宝贵意见。

编 者

1997年7月

绪 论

含有大量任意分布的彼此连通且形状各异、大小不一的孔隙的固体介质叫做多孔介质。流体通过多孔介质的流动叫做渗流。渗流力学是研究流体在多孔介质中的运动形态和规律的科学。

渗流力学是流体力学的一个重要分支,又是流体力学和多孔介质理论、表面物理、物理化学、固体力学、生物学等学科交叉渗透的一门边缘学科。

渗流现象普遍存在于自然界中,在冶金、化工等工程中遇到的渗流问题称为工程渗流;在人体及动植物体内出现的渗流现象称生物渗流;而石油、天然气、地下水等流体在地下的储集层中的渗流则称为地下渗流。

由于多孔介质具有孔道内径小,毛细管作用普遍,比表面很大,表面分子作用显著,表面现象突出而且复杂等特点,所以其流动的阻力大。此外孔道形状和连通形式极为复杂,微观和宏观的非均质性一般都十分严重,同时流动过程往往伴有复杂的物理—化学过程。这些特点把渗流力学与其他流体力学明显区别开来,而成为一门独立的分支学科。它是一门基础学科,同时又有着广泛的应用性。

在社会主义建设中,渗流力学越来越显示出它的重要性。“地下渗流”是开发地下流体资源的理论基础。石油、天然气、地下水、地热都存在于多孔介质中(地层中),因此,开发流体矿床必须掌握渗流规律:“工程渗流”是冶金、化工、机械等部门利用多孔技术的基础,例如,冶金工业中用氩气通过多孔耐火砖进行钢液脱气,化学工业的催化塔、填充床的渗流运动,都是利用多孔介质渗流来改进工艺技术的;“生物渗流”的研究对于认识生命活动规律及其控制,具有重要意义。因为在动植物体内,分布着大量的毛细管及微细孔隙,其间的流体流动,如动物体内的血液流动、植物体内的矿物质的输送等都属于渗流范畴。由此可见,在实现四个现代化的生产过程和科学实验中,诸如,开发油气田、利用地下水及地热资源、水利工程、农田灌溉、土壤改良、生物工程、化工生产、机械冶金以及环境保护、地震研究、防止城市地面沉降等都和渗流力学有着密切的关系。

本课程只研究流体在油气层中的渗流形态和渗流规律,它属于地下渗流的一部分。地下渗流力学起源于19世纪50年代,由于当时给水排水工程的需要,在实验的基础上建立起了古典渗流力学的基本定律——达西定律。由于近半个多世纪以来,石油及天然气工业的迅速发展,使得油气渗流的研究,成为渗流力学最活跃的部分。它的作用已经渗入到油气田开发工作的各个环节。

本课程是石油工程专业的重要专业基础课之一,同时也是石油地质专业的选修课。作为石油工作者学习“油气层渗流力学”的目的,是为了把它当作认识油层、改造油层的工具,当作油气田开发设计、动态分析、油气井开采、增产工艺、反求地层参数、提高采收率等的理论基础。

随着科学技术的迅速发展,也推动渗流理论向着更新的广度和深度发展。从深度上,将逐渐向着宏观和微观相结合的方向发展,从广度上看,已开始出现了物理化学渗流、多重介质渗流和非牛顿液体的渗流等新的分支,对所有这些新的内容目前尚处于探索阶段。但随着现代新

技术的不断涌现,可以为渗流理论的研究提供有力的手段,必将促使渗流理论向着更高的水平发展。另外,随着电子计算机技术的飞速发展大大促进了渗流理论应用方面的迅速发展,这将在专门的课程中介绍。

目 录

绪 论	(1)
第一章 渗流的基本概念和基本规律	(1)
第一节 油气储集层	(1)
第二节 渗流过程中的力学分析及驱动类型	(2)
第三节 渗流的基本规律和渗流方式	(7)
第四节 非线性渗流规律	(11)
第五节 在低速下的渗流规律	(12)
第六节 两相渗流规律	(14)
第二章 油气渗流的数学模型	(17)
第一节 建立油气渗流数学模型的原则	(17)
第二节 运动方程	(20)
第三节 状态方程	(20)
第四节 质量守恒方程	(22)
第五节 典型油气渗流数学模型的建立	(27)
第六节 数学模型的边界条件和初始条件	(30)
第三章 单相液体稳定渗流理论	(33)
第一节 基本概念	(33)
第二节 单相液体稳定渗流基本方程的解及其应用	(33)
第三节 井的不完善性对渗流的影响	(43)
第四节 油井的稳定试井	(45)
第五节 势的叠加和多井干扰理论	(46)
第六节 势的叠加原理的典型应用	(53)
第七节 考虑边界效应的镜像反映法	(57)
第八节 复势理论在平面渗流问题中的应用	(64)
第九节 平面渗流场的保角变换求解方法	(77)
第十节 等值渗流阻力法	(85)
第四章 弹性微可压缩液体的不稳定渗流理论	(93)
第一节 弹性不稳定渗流的物理过程	(93)
第二节 无限大地层弹性不稳定渗流数学模型典型解	(96)
第三节 弹性不稳定渗流的叠加和映射	(99)
第四节 圆形封闭地层中心一口井拟稳态时的近似解	(101)
第五节 带时间变量边界条件的不稳定渗流——杜哈美原理	(102)
第六节 有界地层弹性不稳定渗流数学模型典型解	(105)
第七节 油井的不稳定试井分析方法	(109)
第五章 气体渗流理论	(113)
第一节 天然气的性质	(113)

第二节	气体渗流数学模型·····	(114)
第三节	气体稳定渗流方程及其解·····	(115)
第四节	气井的稳定试井·····	(123)
第五节	气体不稳定渗流微分方程的典型解·····	(125)
第六节	气井的不稳定试井·····	(130)
第六章	两相渗流理论基础·····	(139)
第一节	两相渗流数学模型的建立·····	(139)
第二节	活塞式水驱油·····	(146)
第三节	非活塞式水驱油·····	(148)
第四节	油气两相渗流的物理过程·····	(160)
第五节	油气两相稳定渗流·····	(163)
第六节	油气两相不稳定渗流·····	(166)
第七节	气顶及溶解气混合驱动的渗流问题·····	(170)
第七章	复杂条件下的渗流理论简介·····	(172)
第一节	孔隙介质中的物理化学渗流·····	(172)
第二节	非牛顿液体的渗流·····	(183)
第三节	非等温渗流·····	(193)
第四节	各种复杂介质中的渗流·····	(197)
第八章	双重介质渗流·····	(207)
第一节	双重介质单相渗流数学模型的建立·····	(208)
第二节	双重介质简化渗流模型无限大地层典型解及应用·····	(209)
第三节	双重介质简化渗流模型($K_2=0$)有界封闭地层典型解·····	(213)
第四节	双重介质中的油水两相渗流·····	(216)
附录:	渗流力学习题集·····	(221)
附表:	幂积分函数表·····	(231)

第一章 渗流的基本概念和基本规律

第一节 油气储集层

油气层是油气储集的场所和流动空间。储集层限制着流体运动的范围,影响流体的渗流形态,同时还决定流动边界形状。所以,油气储集层是渗流重要的外部条件。

目前我国发现的油气藏,可以分为两大类:层状油藏和块状油藏。

层状构造往往存在于海相沉积和内陆盆地沉积当中,一般具有:多油层、多旋回的特点。从纵向看,由于受到沉积韵律的支配,一个大的沉积旋回常可分成一个或几个油层组,每一油层组又可划分为几个油层,层内又可化分为若干小层,这些小层之间常有泥岩、泥质砂岩等作为盖层、夹层与底层。在一般压力下储集层中的流体难以穿越盖、底层而流动。由于构造运动,使得大而缓的盆地中形成相对隆起的部分,从而形成“构造”。在构造中,油、气、水按重力规律分布,气体密度最小,占据构造上部而形成气顶,油的密度较大,存在于构造中部,水的密度最大,所以位于构造的下部。

这类层状构造从横向水平延伸情况来看,它的边界存在着两种情况:封闭边界和定压边界。如果层体为孤立体,周界为断层或岩性边界所圈闭且没有边水供给,就叫做封闭边界,如图 1-1 所示;如果层体较稳定,一直延伸到地表,并且有边水供给区,在边界上又保持一个恒定的压头,就叫做定压边界,如图 1-2 所示。

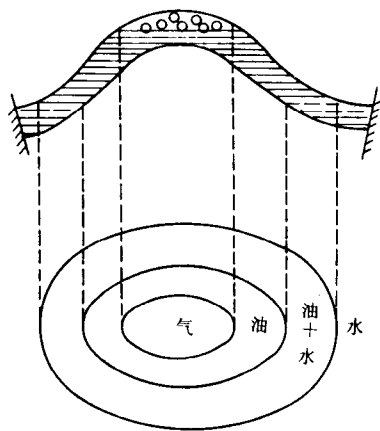


图 1-1 封闭边界油藏

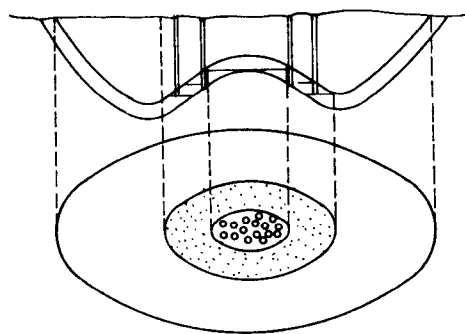


图 1-2 定压边界油藏

对于层状油藏,可以按层划分水动力学系统,并认为流动只是在平面上进行,纵向上流体的运动和物质交换可以忽略不计。因此,在渗流计算中,实际上可以把层状构造油气层看成是一个等厚度的薄板,将渗流问题简化为平面渗流问题。

另一类是块状油藏。灰岩或白云岩油气藏往往在有限的圈闭面积内含有很厚的沉积物,以后又经过长期的溶蚀作用,白云岩化作用及构造应力作用使得在相当厚度的油藏中都具有储集油气的能力。因此,块状油藏就不能不考虑纵向上流体的流动和交换,此时往往还必须考虑

毛管力和重力的作用。在这类油藏中,油、气、水的分布在纵向上可分为三个区:纯油区(有滞留水)、过渡区及纯水区。过渡区又分为三个带:含束缚水过渡带、油水同出过渡带和残余油过渡带。由于块状油藏厚度相当大,必须考虑流体纵向流动,所以流体在块状油藏中的流动是一个三维流动问题。

第二节 渗流过程中的力学分析及驱动类型

一、力学分析

油、气、水之所以能在岩石孔隙中渗流是由于各种力作用的结果。

1. 流体的重力和重力势能

流体具有质量,在重力场中受到地球的吸引而有重力。渗流过程中,流体的重力和它的相对位置联系起来,就表现为重力势能,用压力表示则为:

$$P_z = \rho g z \quad (1-2-1)$$

式中 P_z ——表示重力势能的压力,Pa;

ρ ——流体密度, g/cm^3 ;

z ——相对位置高差,m;

g ——重力加速度, m/s^2 。

重力有时是动力,有时是阻力,如图 1-3 所示。

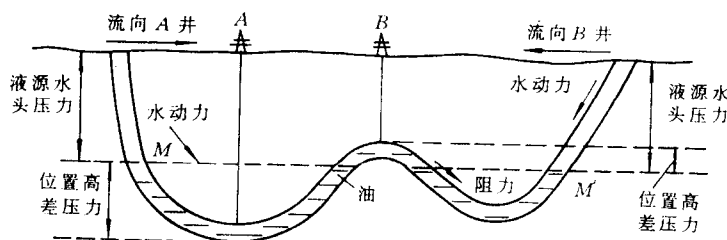


图 1-3 流体重力势能图

对 M 点,液源压力作用于该点上,推动 M 点的流体质点流入井 A ,这种邻近流体重力势能产生的压力将作为动力推动液体流入井中,对流体质点本身所具有的重力来说,当该点向下运动(如 M 点、向井 A 流动)时表现为动力,而该点向上运动(如 M' 点向井 B 流动)时表现为阻力。

2. 流体的质量和惯性力

惯性是物体所固有的一种物理特性,其大小取决于质量,流体的质量大小一般用密度表示。

流体由于具有质量,因此也具有惯性,当流体运动时,惯性使其总要维持原状,因而惯性力在渗流过程中多表现为阻力。由于渗流时渗流速度通常很小,常忽略惯性力。

3. 流体的粘度及粘滞力

粘滞性是流体的一种特殊属性。在流动的流体中,如果各层流体流速不同,将有一对作用力和反作用力,使原来快的流层减速,而慢的流层加速。这一对等值而又相反的力阻碍着流层的相对运动。流体的这种属性叫粘滞性。度量粘滞性大小的参数叫粘度,由牛顿内摩擦定律描

述为:

$$F = \mu A \frac{dv}{dy} \quad (1-2-2)$$

式中 A ——两流层的接触面积, m^2 ;

$\frac{dv}{dy}$ ——沿流层法线方向的流速梯度, $m/(s \cdot m)$;

F ——内摩擦力(粘滞力), N ;

μ ——粘滞系数(又称绝对粘度), $Pa \cdot s$ 。

粘度单位通常用 $mPa \cdot s$ 表示:

$$1Pa \cdot s = 10^3 mPa \cdot s$$

粘度单位以 $g/(cm \cdot s)$ 表示时称为“泊”:

$$1 \text{ 泊} = 100 \text{ 厘泊 (cP)}$$

cP 与 $mPa \cdot s$ 的换算关系为:

$$1mPa \cdot s = 1cP$$

在渗流中,粘滞力为阻力,且动力消耗主要用于渗流时克服流体粘滞阻力。

4. 岩石及流体的压缩性和弹性力

岩石和其中饱和的流体均具有压缩性(或弹性),因此,使得油气层渗流过程中产生弹性力。油气层岩石埋藏于地下几百米甚至几千米,油气层上面覆盖的岩柱压力被油气层岩石本身骨架和其中饱和的流体所承受。因此,储集层岩石和其中的流体都处于受压缩状态。而油层除承受上覆岩柱压力之外,本身也承受油层压力。

油气层岩石和其他固体一样,在外力作用下,它的形状和体积都要发生变化,当消除外力时,它又能恢复到原来的形状和大小,我们把岩石能恢复原状的性质叫岩石的弹性,又称压缩性。

在油气开采以前,油层内岩石和流体都处于均衡受压状态,各种力是互相平衡的,当油气层投入开采之后,油气层的压力不断下降,上覆岩柱压力和油层内流体压力之间形成压力差,使之失去平衡而迫使岩石颗粒变形,排列更加紧密,结果导致岩层孔隙体积的减少,如图 1-4 所示。由于孔隙体积的减少,将压缩孔隙中的流体使之产生弹性力,驱使流体向压力较低的方向运动。

岩石颗粒变形后,孔隙体积的缩小程度,取决于岩柱压力(外压)和油气层流体压力(内压)的差值,同时还与岩石本身的压缩性有关。岩石的压缩性常用压缩系数表示:

$$C_i = \frac{\Delta V_i}{V_i} \cdot \frac{1}{\Delta P} \quad (1-2-3)$$

式中 ΔV_i ——孔隙体积的变化量;

V_i ——岩石的外表体积;

C_i ——岩石的压缩系数,单位为 $(1/10^{-1}MPa)$,它表示油层压力每降低 $10^{-1}MPa$ 时,单位体积岩石中孔隙体积的缩小值。

由于岩石颗粒的组分不同,而且又由于岩石的孔隙结构也不同,孔隙形状和承受力的作用

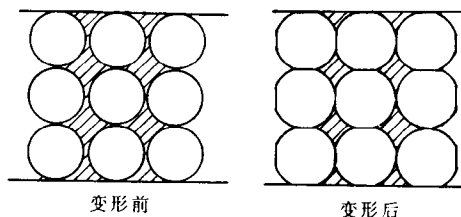


图 1-4 地层中岩石颗粒变形图

点均不一样,因此各类岩石的压缩系数是不一样的。

岩层中的流体(油、水、天然气)也具有压缩性,当作用于流体上的外力增加时,其体积会缩小,反之会膨胀。在油气开采过程中,当油气层压力降低时,流体体积膨胀,产生弹性力,推动流体流入井底。液体的压缩性常用液体的压缩系数来描述,可表示为:

$$C_L = - \frac{\Delta V_L}{V_L} \cdot \frac{1}{\Delta P} \quad (1-2-4)$$

式中 V_L ——液体的绝对体积;

ΔV_L ——压力改变 ΔP 时,流体体积相应的变化量;

C_L ——液体的弹性压缩系数,表示压力改变 10^{-1}MPa 时,单位液体体积的改变量,单位为 $(1/10^{-1}\text{MPa})$ 。式中负号表示液体体积变化方向与压力变化方向相反。

气体的压缩性比液体大得多。对于理想气体,气体的压缩或膨胀服从波义耳定律;对于真实气体将用压缩因子校正。

需注意的是,对固体而言,弹性变形是有限度的。当外力超过某一极限时,就会发生塑性变形。流体在弹性介质和塑性介质中的渗流规律是不同的。

弹性能是油气开采中的重要能量,在油气田开发的初期,多数为弹性开采。

5. 毛管力

油气层是由无数个微小的毛细管连接组成的,这些毛细管纵横交错,四通八达,当渗流由一种流体驱替另一种流体时,在两相界面上会产生压力跳跃,它的大小取决于分界面的弯曲率(曲度),这个压力的跳跃就称为毛管压力,用 P_c 表示。

毛管力与流体性质和曲率之间的关系,用拉普拉斯方程来表示:

$$P_c = \sigma \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \quad (1-2-5)$$

式中 r, r' ——分界面曲率主半径;

σ ——液液界面的表面张力。

在渗流中,毛细管力既可表现为渗流动力,也可表现为渗流阻力。在驱替压力不大时,若油藏岩石亲水,则水驱油时毛管力为动力;若油藏岩石亲油,则水驱油时毛管力为阻力。

二、与油藏有关的压力概念

以上对油气渗流过程中的力学现象和作用机理进行了讨论,然而油藏内流体所受的各种力往往以压力的形式来表示。

外力所做的功将引起地层内液体能量的变化,这种变化将通过压力的变化来反映。因此从本质上说压力是用来表征油藏能量的一个物理量。下面将讨论与油气储集层有关的几个压力概念。

1. 原始地层压力 P_o 。

油藏开发前流体所受的压力,实测的原始地层压力一般是在油田所钻的第一批探井中测得。

2. 供给压力 P_s 。

油藏中存在液源供给区时,在供给边缘上的压力。在人工注水条件下,水井井底压力即为供给压力。

3. 井底压力 P_w 。

油井正常生产时,在生产井井底所测得的压力称为井底压力,也称为流动压力,简称流压。

4. 折算压力 P_r

油藏在开发前,整个油层处于平衡状态,油藏各点流体所具有的总能量是相等的。由水力学知单位质量液体所具有的能量由比位能、比压能和比动能组成。

用 M 表示油层中任意点,用 z 表示 M 点标高, P 表示 M 点的实测压力值, ρ 表示油层条件下液体密度, v 表示 M 点液体的流速,则 M 点液体所具有的总能量即总水头 H 为:

$$H = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$$

由于液体在油层中渗流时,在孔隙中的流动速度很小,它的平方项更小,比动能可以忽略不计,这样总水头可写为:

$$H = z + \frac{P}{\rho g}$$

将总水头用压力形式表示为:

$$P_r = \rho g H = P + \rho g z \quad (1-2-6)$$

P_r 称为折算压力,它表示油层中各点流体所具有的总能量。油藏在未开发前,处于静止状态,各点总能量相等。设 $M_1, M_2, M_3 \dots$ 为油藏中不同的点,这时有

$$P_1 + \rho g z_1 = P_2 + \rho g z_2 = P_3 + \rho g z_3 = \dots$$

上式中 $P_1, P_2, P_3 \dots$ 为 $M_1, M_2, M_3 \dots$ 点的实测压力值, $z_1, z_2, z_3 \dots$ 为各点标高。

只有在各点标高相等时,即 $z_1 = z_2 = z_3 = \dots$ 时,这些点的实测压力才相等。

一般习惯上把原始油水界面选为计算折算压力的基准面。

例 某井油层中部海拔—940m,油水界面海拔—1 200m,地层原油密度 0.85,实测油层中部压力为 9.9MPa(表压),求折算到原始油水界面的折算压力。

解: 标高 $z = 1\,200 - 940 = 260\text{m}$

油的密度 $\rho = 0.85\text{g/cm}^3 = 850\text{kg/m}^3$

$$P_r = 9.9 \times 10^6 + 850 \times 9.8 \times 260 = 12.11 \times 10^6 \text{Pa} = 12.11 \text{MPa}$$

5. 压力梯度曲线

在直角坐标系中,根据最初的探井所实测到的油藏埋藏深度(油层中部位置) H 和实测压力 P 所得的关系曲线,称为压力梯度曲线,实际上它是一条直线,如图 1-5 所示。这种直线可以用以下的数学形式来表示:

$$P = a + bH \quad (1-2-7)$$

不同的水动力学系统,其压力梯度曲线是不同的。

在油藏投入开发以后,油藏原始状态被破坏,此时所钻的井就不可能再直接测得其原始地层压力,只能根据该井的油层中部深度,在压力梯度曲线上推算其原始地层压力。

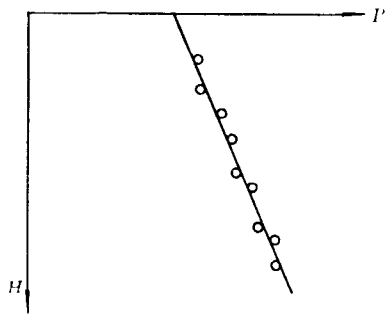


图 1-5 压力梯度曲线

三、驱动类型

当油井钻穿油层,原油即源源不断地流入井底。

一般来说,油藏能量主要来自:边水的压能,岩石和液体的弹性能,气顶中压缩气体的弹性能,

原油中溶解气体的弹性能和原油本身的重力。

在自然条件下,流体在多孔介质中流动时,常常是各种能量同时起作用。然而在不同时期,驱使油气流向井底的能量中必有一种能量起主要作用。在石油开采过程中,就根据主要依靠哪一种能量驱出石油来区分油藏的不同驱动方式。驱动方式不同,开采过程中的产量、压力变化规律也不同,最终采收率也不同。因此,鉴别油藏的天然驱动方式,对合理开发油气田有着重要意义。

1. 重力水压驱动

主要依靠与外界连通的水头压力或人工注水的压能作为驱油的动力。如果在开采过程中,这种压力维持不变,且油藏内岩石及流体的弹性力又很小,可忽略不计,这时的重力水压驱动方式又称为刚性水压驱动。

2. 弹性驱动

主要依靠岩石及液体的弹性能作为驱油的动力。如果油藏具有很大且连通性很好的含水区,这时含水区的弹性能起着重要的作用,此时称之为弹性水压驱动。

3. 气压驱动

油藏内具有气顶,而且主要依靠气顶中的压缩气的弹性膨胀来驱油的一种开采方式。

4. 溶解气驱

地层压力低于地层饱和压力后,原来溶解在原油中的溶解气就会从原油中分离出来。主要依靠这种不断分离出的溶解气的弹性作用来驱油的方式为溶解气驱。由于原油中溶解的气量总是有限的,故这种方式也常称为消耗性的开采方式。其采收率很低。

5. 重力驱动

原油依靠其本身重力的作用流向井底。由于重力的作用总是有限的,且重力作用的大小与油层的倾斜度有关,故一般说来,只是在其他能量均已枯竭,且油层具有明显的倾角时才会出现这种驱动方式。

由上面的分析可知,驱动方式只是反映油藏中的主要动力,但不是说某一种驱动方式存在唯一的一种动力,而是其他的动力相对来说不起主要作用。驱动方式也不是一成不变的,例如一个地层压力高于饱和压力的油田,并且生产井井底压力也高于饱和压力,在开发初期,当生产井投产后,在井底形成的压力降落还未传到边缘时,驱油入井的动力是压力降范围内的液体和岩层的弹性能,因此,这时的驱动方式为弹性驱动。当压力降传到含水区后,驱油的动力主要是水区的弹性能,当压力降继续传到供给边缘处,如果该处又有足够的水量补充,则油藏转化为刚性水压驱动,流体和岩石的弹性能不再成为主要的驱油动力。

如果所采用的开采方式不合理,在油藏内部不合理地过量采油,使局部地区压力迅速低于饱和压力,可能使局部地区转为溶解气驱。但是若采用人工注水方法,则凡是注水见到效果的地区,可以转化为刚性水压驱动。由此可见,油藏的驱动方式受到多种因素的影响,一方面它受到储集层类型、厚度、面积、构造形态以及油气层的岩性变化诸因素的影响,另一方面它还受着油田的开发方法及油井的管理措施的影响,此外,还与采油速度有关。总之,开发油田的过程,就是消耗地层能量驱出原油的过程。在一定的自然条件下,若要保持有较高的采收率,采油速度就要有一定限制,超过这个限度,油藏的最终采收率将大大降低。反之,若向油藏补充能量,就可以使油藏的采油速度提高。因此油藏的驱动方式可以人为地加以控制,以保证高速度、高水平地开发油气田。

第三节 渗流的基本规律和渗流方式

在油田开发过程中,为了确保油井长期高产稳产,就必须认识并掌握油层中的油气水的流动规律。虽然不同油田的实际情况和油气水的渗流状况不同,但是在不同条件下渗流的动力和阻力的基本关系又有共同之处。本节将介绍油气水渗流的基本规律——达西定律。

一、达西定律

构成多孔介质的岩石颗粒形状各异,大小不均,孔隙极小,孔道复杂,岩石的比表面积很大,因此流体渗流时阻力很大,流动速度很小,流动规律复杂。人们最初研究渗流规律是以实验为基础的宏观研究方法。

如图 1-6 为最早的研究渗流规律的实验装置。装置为一直立的开口圆筒,侧面装有测压管,筒中距底一定高度处安装滤网 b ,其上填装砂样至一定高度,水从上部进入筒中,用溢流管 a 保持恒定水位,形成稳定压头。液体渗过砂层从圆筒底部流出,流出量大小用出口阀 C 调节。

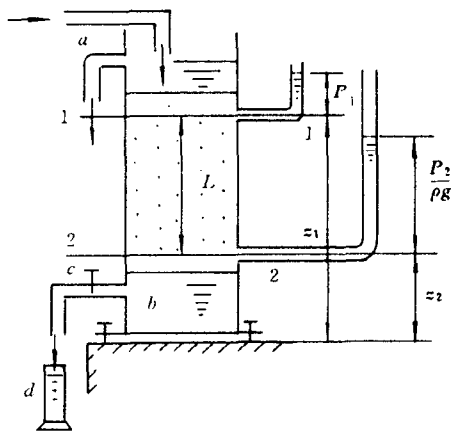


图 1-6 达西实验装置图

在不同岩心截面积,不同岩心砂粒直径(即填砂岩心渗透率不同),不同液体粘度和不同两侧压管距离的条件下,测定流出液量和测压管水头高度。1-1 截面总水头高度 $H_1 = z_1 + \frac{P_1}{\rho g}$ 。(忽略流速水头),2-2 截面总水头 $H_2 = z_2 + \frac{P_2}{\rho g}$,两截面水头差 $\Delta H = \left(z_1 + \frac{P_1}{\rho g}\right) - \left(z_2 + \frac{P_2}{\rho g}\right)$,其折算压差为 $\Delta P_r = \rho g \Delta H$ 。

大量实验研究表明,流量 Q 与折算压力差 ΔP_r ,岩心截面积 A 成正比,与液体粘度 μ ,测压管两截面距离 L 成反比,其比例常数与填砂粒径有关,砂粒粒径越大,流量越大,反之流量越小。可用公式表示为:

$$Q = \frac{K}{\mu} A \frac{\Delta P_r}{L} \quad (1-3-1)$$

式中 Q ——通过砂岩的流量, cm^3/s ;

K ——砂岩的渗透率, μm^2 ;

A ——渗流截面积, cm^2 ;

L ——两渗流截面间的距离, cm ;

μ ——液体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

ΔP_r ——两渗流截面间的折算压力差, 10^{-1}MPa ,即大气压。

上式称为达西公式,因 Q 与 ΔP_r 成直线关系,又称达西直线定律,它是 1856 年法国水利工程师达西为解决给水问题通过大量实验得到的。式中各物理量采用混和单位。

渗透率的单位可用达西(darcy)(为纪念达西对渗流力学所作的巨大贡献)或毫达西表示,这在外文文献和以前的渗流力学和其他有关书中常见。换算关系为:

1 达西(D)=1 000 毫达西(mD)

1 微米²(μm^2)=1 达西(D)

注意,在应用达西公式时,或应用以达西定律为基础导出的其他公式时,一定要用上面所规定的混和单位。

(1-3-1) 式变形,可写为:

$$Q = \frac{\Delta P_r (\text{动力})}{\frac{\mu L}{KA} (\text{阻力})} \quad (1-3-2)$$

上式表明,渗流量的大小取决于动力大小与阻力大小之比,即两端压差越大,渗流量越大,成线性关系;阻力越大,渗流量越小。阻力的大小与液体粘度、渗流段长度成正比,与岩石渗透率和渗流截面积成反比。

实验和油田实际资料表明,因油层流体渗流速度很小,一般情况下流体流动规律均满足达西渗流定律,即流量 Q 与折算压力差成线性关系。但当 Q 继续增大, Q 与 ΔP_r 就会偏离直线关系,出现非线性渗流,如图 1-7 所示。在裂缝性地层或井底附近可能会出现这种情况。在气藏中,因气体粘度小,渗流速度大,也会出现这种情况。

上述实验装置如水平放置,则岩层水平,各点位置高度相同,实测压力差就等于折算压力差,此时(1-3-1)式可写为:

$$Q = \frac{K}{\mu} A \frac{\Delta P}{L} \quad (1-3-3)$$

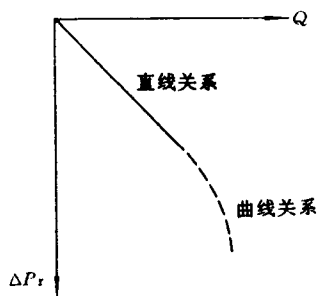


图 1-7 流量与折算压差关系

式中 ΔP 为实测压力差。在实际油层渗流过程中,如为水平地层,则可用实际测得压力代入上式计算,如为角度较大的倾斜地层,则应把实测压力换算成折算压力。

下面介绍两个基本概念。

1. 渗流速度

渗流量与渗流截面积之比,称渗流速度,常用 v 表示,则

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1-3-4)$$

式中 Q ——渗流量;

A ——渗流截面积。

2. 流体真实速度

渗流量与渗流截面的孔隙面积之比,表示液体在多孔介质中真实的平均运动速度,常用 u 表示,则

$$u = \frac{Q}{A_p} \quad (1-3-5)$$

式中 A_p ——渗流截面的孔隙面积。

因孔隙度 ϕ 在均匀孔隙介质中可表示为:

$$\phi = \frac{V_p}{V} = \frac{A_p \cdot L}{A \cdot L} = \frac{A_p}{A}$$

式中 V_p ——岩心孔隙体积;

V ——岩心体积；

L ——岩心长度。

将孔隙度 ϕ 的表达式代入(1-3-5)式：

$$u = \frac{Q}{A \cdot \phi} = \frac{v}{\phi}$$

即

$$v = \phi u \quad (1-3-6)$$

上式为渗流速度与真实速度间的关系式。因 ϕ 小于 1, 所以渗流速度小于真实速度。渗流速度是渗流力学中的重要概念, 而真实速度常用于计算流体质点的排出时间。

有了渗流速度的概念后, 达西公式可表示为：

$$v = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (1-3-7)$$

为了理论研究的方便, 把上式进一步写成微分形式：

$$v = - \frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (1-3-8)$$

因式中在 x 增加的方向压力 P 降低, 为使渗流速度为正, 则在式中加负号。(1-3-8)式为达西定律的渗流速度表达式, 是渗流力学中重要的基本公式, 也称为运动方程。

下面从力的分析入手推导达西定律。取如图 1-8 所示倾斜圆柱体模型, 作用在两端的压力为 P_1 和 P_2 , 则：

(1) 作用在圆柱体液体上的力为：

$$(P_1 - P_2) \cdot \phi A$$

(2) 流体沿 x 方向以 v 渗流时受到的摩擦力 P_μ ; 用牛顿内摩擦定律表示为：

$$P_\mu = \alpha \mu A v L$$

式中 α ——与岩石结构和几何特征有关的系数。

(3) 液体本身重力在流动方向上的分力：

设液柱与水平面夹角为 θ , 则

$$P_z = \rho g A \phi L \sin \theta = \phi A \cdot \rho g (z_1 - z_2)$$

式中, ρ 为液体密度。因渗流速度很小, 忽略惯性力作用, 则有力的平衡关系为：

$$\phi \cdot A (P_1 - P_2) + \phi A \cdot \rho g (z_1 - z_2) = \alpha \mu \cdot A v L$$

因而

$$Q = v \cdot A = \frac{\phi A [(P_1 + \rho g z_1) - (P_2 + \rho g z_2)]}{\alpha \mu L}$$

令 $\frac{\phi}{\alpha} = K$, 则

$$Q = \frac{K}{\mu} A \frac{P_1 - P_2}{L} \quad (1-3-9)$$

上式与(1-3-1)式相同。上式也可写为

$$Q = \frac{AK}{\mu L} [(P_1 - P_2) + \rho g \cdot \Delta z] = \frac{K}{\mu} A \left[\frac{P_1 - P_2}{L} + \rho g \cdot \sin \theta \right] \quad (1-3-10)$$

(1-3-10)式为倾斜地层考虑重力影响时的达西公式。当 θ 为零时, 上式为

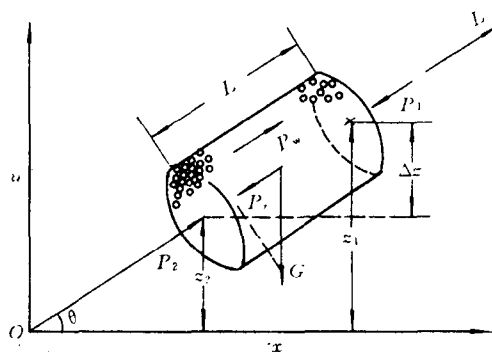


图 1-8 单元体积受力图