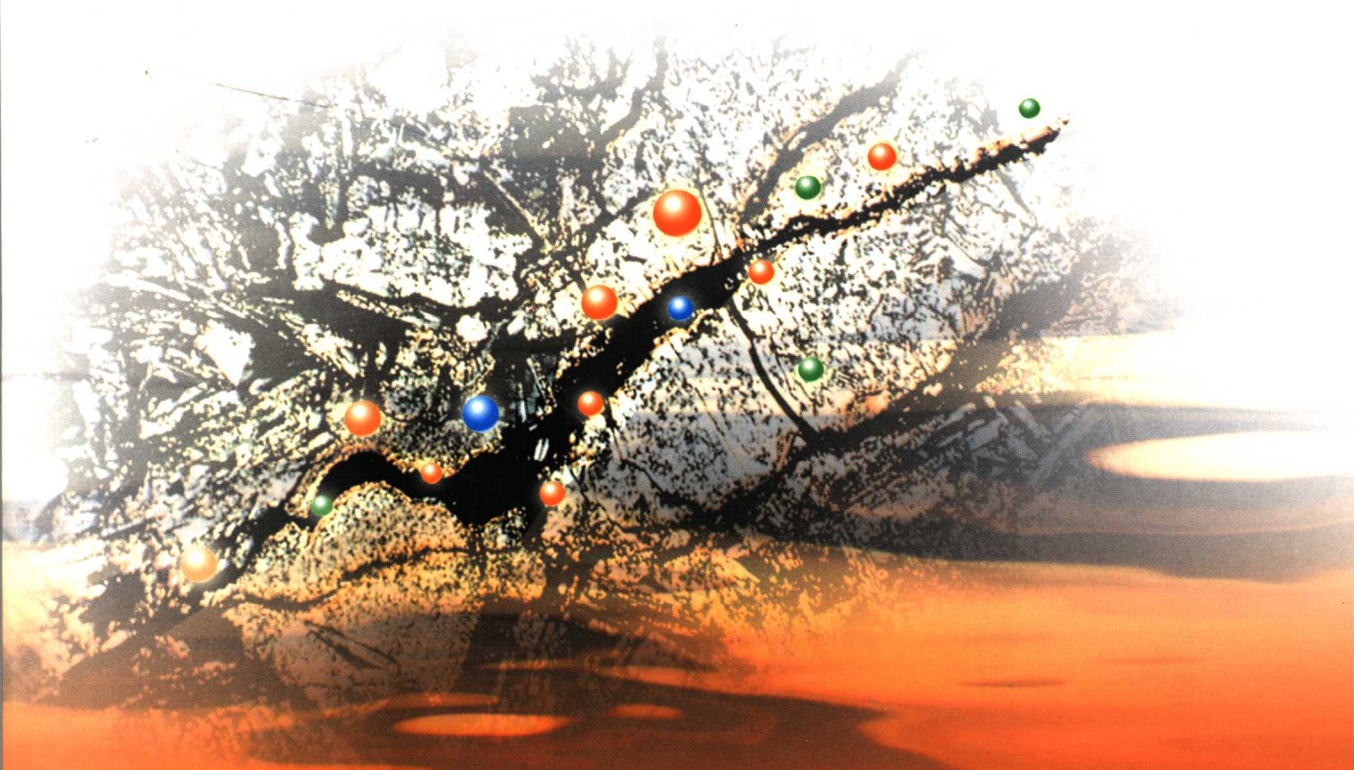




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

渗流力学基础

王晓冬 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

渗流力学基础

王晓冬 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是讲述渗流力学基础理论及其在石油工程中应用的教科书。本书以油气田开发为背景,重视专业基础,详细阐述了渗流力学的基本概念、基本原理和应用方法,主线突出,系统性强。同时注重给出各个知识点的历史沿革,每章附有参考文献,便于读者深入学习。

本书主要作为高等学校石油工程专业本科教材,也可供石油地质、地下水力学等专业本科生学习使用,还可作为研究生及工程师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

渗流力学基础/王晓冬编著.

北京:石油工业出版社,2006.9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 7-5021-5704-2

I. 渗…

II. 王…

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(2006)第 103762 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.cn

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技排版中心

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.5

字数:264 千字 印数:1—3000 册

定价:16.00 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

本教材是按石油工程专业本科四年制教学大纲编写的,它同时适用于石油地质专业和地下水动力学专业四年制本科教育。

渗流力学是石油与天然气工程学科的专业基础,无论是油气井工程还是油气田开发工程,渗流力学都是必不可少的基础理论。在油气井工程中,钻井液选择、井眼稳定性判断等方面离不开渗流力学理论的指导;就油藏开发来说,从井网部署、完井评价、试油试采到确定油井工作制度、油气井测试解释、选择增产措施等皆以渗流力学的研究成果为基础。同时,渗流力学又是石油工程学科中最活跃的领域之一。近年来,由于油气开采技术的进步,引发了许多渗流力学方面的课题,这些课题的深入研究极大地促进了渗流力学学科的发展。

本书尊重石油院校现有教材的内容,积极吸纳近年来渗流力学的最新发展,在编排、内容、习题等各个方面适当吐故纳新,具有如下特点:

(1) 撰有比较完整的渗流力学发展简史,有利于学生了解渗流力学发展的轮廓和脉搏;

(2) 重视专业基础,以油气田开发为背景,详细阐述基本概念、基本原理和应用方法,经过扬弃和补充后的基础部分主线突出,系统性强;

(3) 强化如何运用高等数学手段和高速电子计算机解决矿场实际问题,尽量直观地阐述抽象的数学原理,并辅以具体的应用方法,极力体现“渗流力学”力学类课程特性。书中补充了一些必要的高等数学理论和计算数学知识,有利于工科学生学会用计算机解决复杂的矿场实际问题;

(4) 简要给出每个知识点的历史发展情况,激发学习兴趣和教材的可读性;

(5) 编写了部分理论分析类习题,以改善现存教材应用类习题偏多的不足;

(6) 每章附有重要参考文献,既便于了解学科发展前沿,亦便于培养良好的学风。

本书由中国地质大学(北京)王晓冬主编。全书共分九章,其中大部分章节由王晓冬编写,第五章第一节、第六章第六节由侯晓春编写,大部分习题由刘鹏程选编。全书由王晓冬负责统一修改和定稿。

在本书编写过程中受到中国地质大学(北京)的资助,得到学校教务处、能源学院同事们的关心和支持;书中参考和引用了大量文献,有的因限于篇幅甚至未能列出,在此谨向相关学者深表谢意。书中如有不当之处,敬请广大同仁和读者指正。

编著者在研习渗流力学十数年中曾蒙刘慈群、郭尚平、孔祥言、刘慰宁、翟云芳、陈钦雷等先生的谆谆教诲,领悟颇多,不敢有忘,在此一并表示衷心感谢。

编著者

2006年6月于北京

目 录

绪论	(1)
0.1 地下渗流理论诞生	(1)
0.2 地下渗流力学和粘性流体力学	(2)
0.3 地下渗流力学回顾	(3)
0.4 渗流理论的发展路线	(5)
0.5 结语	(5)
附录 A 流体力学简介	(5)
参考文献	(7)
第 1 章 基本概念和基本定律	(9)
1.1 基本概念	(9)
1.2 连续介质思想	(13)
1.3 流体状态方程	(14)
1.4 运动方程	(15)
1.5 连续性方程	(22)
1.6 能量守恒方程	(25)
本章小结	(25)
附录 A Henry Darcy 与 Darcy 定律	(25)
附录 B 渗流力学常用单位	(27)
参考文献	(27)
第 2 章 油气渗流数学模型	(29)
2.1 数学模型	(29)
2.2 渗流控制方程组	(31)
2.3 渗流场	(33)
本章小结	(37)
附录 A 偏微分方程的基本概念	(37)
附录 B Hamilton 算子及其表达式	(38)
参考文献	(38)
第 3 章 液体稳态渗流理论基础	(39)
3.1 理想渗流系统	(39)
3.2 非均质地层稳态渗流理论	(45)
3.3 等值渗流阻力法	(51)
3.4 多井稳态渗流理论	(52)
3.5 底水锥进问题	(59)
本章小结	(62)

参考文献	(62)
第4章 液体不稳态渗流理论基础	(63)
4.1 不稳态渗流过程	(63)
4.2 不稳态渗流基本问题	(68)
4.3 圆形系统不稳态渗流理论	(77)
4.4 矩形系统不稳态渗流理论	(86)
本章小结	(90)
附录 A 误差函数和幂积分函数	(91)
附录 B 修正 Bessel 函数	(92)
附录 C 褶积	(93)
附录 D Laplace 变换及其反演	(93)
参考文献	(95)
第5章 气体渗流理论基础	(97)
5.1 气体 PVT 性质	(97)
5.2 气体渗流偏微分方程	(99)
5.3 气体稳定渗流	(101)
5.4 气体不稳态渗流	(105)
本章小结	(107)
参考文献	(107)
第6章 油水两相渗流理论基础	(109)
6.1 油水两相渗流基本概念	(109)
6.2 油水两相渗流控制方程	(112)
6.3 一维单向驱替问题	(115)
6.4 平面径向驱替问题	(120)
6.5 油水两相偏微分方程线性化方法	(122)
6.6 不稳定测量相对渗透率	(122)
本章小结	(124)
参考文献	(124)
第7章 油气两相渗流理论基础	(126)
7.1 油气两相渗流物理过程	(126)
7.2 油气两相渗流控制方程	(127)
7.3 油气两相稳态渗流理论	(128)
7.4 油气两相拟稳态渗流理论——IPR 方程	(129)
7.5 油气两相不稳态渗流方程的近似解法	(130)
7.6 压力与饱和度关系	(133)
本章小结	(135)
参考文献	(135)
第8章 非牛顿流体渗流理论基础	(136)

8.1 引言	(136)
8.2 幂率流体渗流方程	(138)
8.3 幂率流体平面径向稳态渗流问题	(140)
8.4 幂率流体平面径向不稳定渗流问题	(141)
8.5 Bingham 流体渗流问题	(143)
本章小结	(145)
参考文献	(146)
习题	(147)
常用符号说明	(156)

绪 论

自然界中广泛地存在着流体渗流现象。从宏伟的长江三峡水利工程,到小动物的某些脏器毛细血管系统,流体渗流都与之密切相关,所起的作用有时非常重要。渗流力学是研究流体在多孔介质中运动规律的科学,它源于19世纪50年代法国的水力学,兴于20世纪30年代,盛于20世纪中叶,目前发展有所减缓,是一门年青而又发展迅速的应用基础学科。

渗流力学是流体力学的一个独立分支,它可分为三个方面:地下渗流、工程渗流及生物渗流。地下渗流指土壤、岩石和地表堆积物中的流体渗流;工程渗流(工业渗流)指各种人造多孔介质和工程装置中的流体渗流(如污水处理);生物渗流指发生在动植物体内的渗流。

近年来,渗流力学广泛应用于水力学、土力学和石油与天然气工程学,其中尤以石油与天然气工程学为重。不同的工程领域应用渗流力学的侧重点不同。在水力学方面,人们用不混相流体渗流理论预测海水入侵问题,用可混相流体渗流理论计算污水扩散运移,用热耦合渗流理论研究地下热水开发利用等(罗焕炎等,1988);水利工程师经过调查统计发现,由于渗流而造成土坝失事的比例甚至达到45%,这足以使他们重视研究水通过堤坝的渗流对坝体地基安全性的危害(钱家欢等,1980);水文地质学家则注意研究抽水、注水等对地下饱水带的影响,以便能够宏观评价地下水资源的开发和利用效果。在土力学方面,土壤物理学家十分注意研究降雨渗入导致地层饱气带水分的动态变化,因为这会影响地面作物的生长;岩土力学研究人员则用流固耦合渗流理论研究地面沉降以及水库诱发地震等现象。在石油与天然气工程方面,渗流力学几乎涉足于各个区域。矿场工程师们利用它探索油气藏开发时发生的油、气、水等地下流体流动所遵循的规律,从而为制定正确的油气田开发方案、评价储层及分析开发动态、有效地控制和调整开发过程提供基础理论和解决方法。渗流力学是认识油气藏、高效开发油气藏及改造油气藏的科学基础和重要工具(陈钟祥,1981)。目前渗流力学在生物医疗、地震预报、环境保护等学科工程领域的应用亦渐然凝重,有可能成为这些领域理论研究和工程设计新方法、新思维的生长点;渗流力学的发展与应用交织着,它们既相互制约,又相互促进。

0.1 地下渗流理论诞生

人类开发和利用地下水已经有数千年历史。尧时劳动者击壤而歌:“日出而作,日落而息,掘井而饮”,说明当时已经有了挖井采水的知识。早在18世纪,地质学的基本理论已经建立,对地下水的存在和运动已经有了基本认识。19世纪中叶,法国打了一些自流井,生产和生活中有了计算井涌水量和过滤水的要求。最初,法国水力工程师Darcy根据水通过直立填砂圆管的实验确定出多孔介质中渗流的基本规律——Darcy实验定律(Darcy,1856)。1863年,另一位法国水力工程师Dupuit以Darcy定律为基础,研究了一维径向稳态渗流问题,给出圆形水层中心一口完善井的稳定流动产水量公式(Bear,1972)。1889年,俄国数学力学家Жуковский(茹科夫斯基)导出稳态渗流偏微分方程,并指出渗流和热传导在数学描述上的相似性(克利门托夫,1957)。1901年,法国学者Forchheimer研究了非线性渗流问题,给出压力梯度与流量之间著名的Forchheimer二项式。1904年,法国人Boussinesq导出了潜水不稳定渗

流微分方程(Bear,1972)。1922~1930年,苏联学者 Павловский(巴甫洛夫斯基)首先提出用雷诺数作为 Darcy 定律应用判断准则,给出水工建筑下的地下水运动严格的数学理论,创立水电相似模拟方法。1928年,Meinzer 通过观察和实验指出含水层和水可以压缩并具有弹性能。由于渗流力学与水动力学的密切关系,19世纪中叶至20世纪前叶水动力学的发展一定程度上促进了渗流力学的成长,渗流力学的研究对象由水逐渐扩展到其他地层流体。

20世纪30年代,地下不定常渗流理论萌生。物理学家 Hurst(1934)和 Muskat(1934)开始发表液体在多孔介质中不定常渗流研究论文。1921~1934年间,苏联科学院院士 Лейбензон(列宾宗)及其助手在研究了大量实验资料基础上,给出天然气遵守和不遵守 Darcy 渗流的微分方程式,成为苏联油气渗流理论研究的开创者(克利门托夫,1957)。不定常渗流理论是经典渗流力学中最具有代表性、最有魅力的内容之一,正是它的出现和发展才标志着渗流力学学科的发展成型。

0.2 地下渗流力学和粘性流体力学

地下渗流力学应当是流体力学的一个分支,素有“地下流体力学”之称。在流体力学中,Navier-Stokes 粘性流体力学基本方程奠定了近代粘性流体力学基础,它能够在给定边界内描述粘性流体的运动。但是,由于 N-S 方程本身具有非线性以及多孔介质流动通道的复杂和形状的未知,N-S 方程不能有效地解决地下流体渗流问题,取而代之的正是 Darcy 实验定律。事实上,在合适的条件下平均 N-S 方程便可以得到和 Darcy 实验定律相似的结果。尽管如此,地下渗流力学和粘性流体力学依然有着连带的关系。地下渗流力学借鉴了粘性流体力学的许多经典解,如通过著名的 Hagen-Poiseuille 方程导出毛细管渗流定律和非牛顿流体渗流方程(孔祥言等,1999),通过 Laplace 方程导出毛细管压力公式,通过平板层流解给出地层岩石裂缝渗透率等效值等。矿场应用中的许多问题,如地下流体优化开采、渗漏溃坝、地面沉降防治等,都需要渗流力学和流体力学密切结合来解决。

地下渗流力学开拓性地使用了粘性流体力学的连续介质思想,首先将介质的孔隙度和流体的密度定义为连续函数,然后研究渗流过程中油气的流变学本构方程、动量方程、质量守恒方程、状态方程以及能量守恒定律。根据所研究问题的具体特点,这些方程可能有一些简化。例如,能量守恒定律是流体在运动过程中总能量的变化率等于单位时间外力做功和热量变化之和。在一般情况下,流体状态方程形式为 $\rho = \rho(p, T)$,仅有连续性方程、状态方程和动量定理不能使流体运动控制方程组封闭,需要应用能量守恒定律,这时我们必须考虑各种形式的能量及其相互转换(做功、发热及获得势能等)。而在渗流力学中,地层温度来源于地球温度场,在油气藏开采过程中,多数情况下温度变化不大,热能消耗可以从巨大的地心热源来补偿,即使长期注水,注水井井底可能有温度下降现象,但其范围一般很小,所以渗流问题通常不考虑温度变化,即我们通常假定系统存在恒温条件,能量守恒定律自然满足,使得状态方程具有 $\rho = \rho(p)$ 型的简化形式,不涉及能量守恒定律便可以求解控制方程组。

与粘性流体力学的工作方法类似,地下渗流力学的研究方法也是由三部曲——“观察,实验,理论”构成。众所周知,渗流力学中有两个最著名的实验——Darcy 定律适用范围实验和 Klinkenberg(1941)滑脱效应实验,皆是由观察到实验,最后上升为理论的。以第一个实验为例,1933年 Fancher 和 Lewis 最初通过经验观察猜测到,地层中气体或液体的流动可能是层流、湍流或两者的综合,之后他们利用气体通过岩心渗流实验数据分析验证了最初的猜测。

1953 年 Cornell 和 Katz 的研究结果完善了 Fancher 和 Lewis 的实验,他们为分析不同类型岩心实验数据重新定义 Fanning 摩擦系数(f)和 Reynolds 数(Re),并给出了具体的实验结果分析曲线,它与水在管线中流动的 $Re \sim f$ 图有相似的特征,即在低流速下存在层流,经过一段过渡区,随流速增加达到湍流。在层流区,由于雷诺数与摩擦系数成反比,由此直接可以得到 Darcy 定律,说明 Darcy 定律在层流区内成立。在过渡区,可以用一个二项式来表示,进而可得到 Forchheimer(1901)二项式,此式正是天然气井试井分析和产能分析的基础。在过渡区,还可以用压力梯度的幂律式表示基本渗流定律,它是 Forchheimer(1901)二项式的扩展。另外,地下渗流很少涉及过渡区段以后的情形。

0.3 地下渗流力学回顾

根据本文的观点,地下渗流力学成型于 20 世纪 30 年代。30 年代的诸多奠基性的成果对渗流力学后来的发展影响是深远的。水力学家 Theis(1935)提出了一种水井干扰不稳定流动数学模型,其中蕴涵了为后来油藏工程中所广泛应用的压力分析典型曲线拟合思想。由 Wyckoff 和 Botset(1936)提出的相对渗透率的概念, Muskat 等(1934)提出的流体饱和度的概念,将 Darcy 定律推广到多相渗流中,为地下流体多相渗流理论的发展奠定了基础。Muskat(1937)出版了地下渗流力学第一本代表性的著作《均质流体通过多孔介质中的流动》,内容扼要而论述精辟,其中第十章专门阐述了平面径向不定常渗流问题。Hurst、Muskat、Theis 等成为不定常渗流理论最初的奠基人。

20 世纪 40 年代末至 70 年代初,地下不定常渗流的基础理论得到了全面的发展及初步应用。Leverett(1939)、Leverett 和 Lweis(1941)开始进行了油水、气水两相渗流试验,由 Buckley 和 Leverett(1942)提出了水驱油非活塞式两相驱替理论。1942 ~ 1945 年,苏联通信院士 Кочина(科钦娜)完成了 Boltzmann 变换方法求解点源不定常渗流问题,其所著的《地下水动力学》(科钦娜,1964)中对有关水层的不定常渗流问题有过一系列论述。1946 年,苏联学者 Щелкачев(谢尔加乔夫,1955)发表了弹性液体在可压缩多孔介质中的渗流理论。在邻近学科中,热物理学家 Carslaw 和 Jaeger 于 1946 年首次出版《固体中的热传导》一书(Carslaw 和 Jaeger,1959),开拓性地总结了扩散方程的各种解法和解式,成为不定常渗流理论研究的不可多得的数理参考资料。van Everdingen 和 Hurst(1949)采用 Laplace 变换方法求解关于圆形油藏水侵问题的不定常渗流控制方程,他们的工作对后来不定常渗流方程的求解与计算产生了深远的影响。另外,通过非线性渗流数学模型和数值模型研究非等温渗流、非牛顿流体渗流、物理化学渗流等诸方面也取得了一些进展,如 Aronofsky 和 Jenkins(1954)的气体径向流数值计算、Higgins 和 Leighton(1962、1963、1964、1967)的五点井网流管模型等,对此,陈忠祥(1974)、郭尚平和刘慈群等人(1981)曾撰文综述了这些领域的发展情况。令人遗憾的是,在 70 年代以前不定常渗流的研究常常由于理论解式的复杂、难于计算而不能深入,这一点从 Bear(1972)的权威性的作品《多孔介质动力学》中相应的论述可以看出,此时有些不定常渗流数学模型及其解法的发展已经取得了比较好的结果,但缺乏与之相应的高效率的计算方法,这些结果只能限于讨论长时间渐近行为或短时间近似解,严重影响了理论研究的深入和完善。

多重介质渗流的理论研究是从 1960 年 Barenblatt 提出双重介质渗流的数学模型开始的。1963 年 Warren 和 Root 给出了双重孔隙介质拟稳态窜流的点源近似解;1980 年我国学者陈忠祥、刘慈群在双重孔隙介质中两相驱替机理方面的研究具有创新性,为天然裂缝性地层中的水

驱油分析提供了更翔实的理论基础。

中国学者在 20 世纪 50 年代中期(张忠胤,1955;刘慈群,1956、1958、1959a、b、c)有地下水渗流方面的论文发表。1963 年中国科学院兰州地质所有《渗流力学集刊—1》,1964 年有《渗流力学集刊—2》。中国学者起步较晚,但从《渗流力学集刊》中所涉及的研究内容以及研究深度至少与当时世界地下渗流力学的发展水平是相当的,个别论文甚至别具特色。这表明,中国在渗流力学方面的发展是迅速的,并且已经开始应用于大庆油田的开发方案设计之中(郭尚平、刘慈群,1964)。

20 世纪 70 年代初至 80 年代中期,渗流理论在数学建模、计算模拟、应用方法等方面取得了显著成就。在石油与天然气工程领域,有两方面的发展和应用最富有代表性,其一是油气藏数值模拟,其二是油气井动态分析。油气藏数值模拟用数值方法求解多相流体渗流数学模型,把连续函数变成离散函数,用计算机求解,常用的方法是有限差分方法。继 Aronofsky 和 Jenkins、Higgins 和 Leighton 等人的基础工作之后,人们研究了三维三相黑油模型、热采模型、完善的气水锥进模型、组分模型(混相驱和热力采油)、化学驱模型等,其中,研究者 Peaceman (1977、1978)、Stone(1970、1973)、Thomas(1976)等人的成果为后来数值模拟的发展奠定了基础,对此,Watts(1997)曾撰文扼要概述了油气藏数值模拟的发展历程。如果说油气藏数值模拟是用数值方法求解多相流体渗流数学模型的话,那么,油气井动态分析则多数依赖于用解析方法求解微可压缩流体渗流数学模型。自 Earlougher 和 Kersch(1972)开始计算机辅助试井解释工作以来,研究人员利用计算机发展了褶积和反褶积、压力导数方法、模型自动识别、非线性回归拟合等新理论新技术,由此结束了常规分析而开始了现代不稳定试井。由德国统计经济学家 Stehfest(1970)给出的 Laplace 数值反演算法在变定常渗流理论应用和计算中具有划时代意义。Ramey(1976)综述试井分析应用情况的论文中并未提到过 Stehfest 算法,这说明 Stehfest 算法是在 70 年代末或 80 年代初被油藏工程研究人员广泛引用的,其后一发不可收,1990 年 Ramey(1990)再度回顾试井分析发展时大加赞赏了 Stehfest 算法在油藏工程学及地下水力学中的重要作用。1982 年我国学者栾志安、刘慈群等人(1983)及时将 Stehfest 算法引入渗流力学中,并且首先用它研究了非牛顿流体渗流、部分射开井的井壁压力动态等问题。通过 Stehfest 算法,研究人员能够计算如双重介质、多重复合介质、分形介质中的变定常渗流问题,能够分析非牛顿流体的变定常渗流特征及水力压裂井、水平井的二维变定常渗流等许多复杂的渗流问题,仅油藏工程方面引用 Stehfest 算法的研究论文就有数千篇,Horne(1992)对此曾经有客观的评述。

20 世纪 70 年代初至 80 年代末,地下渗流力学得到发展和繁荣,究其原因主要有三点。其一,高速度大容量的电子计算机和高精度测量仪器的出现(如电子压力计等)为深入研究变定常渗流理论提供了强有力工具。其二,应用数学的某些发展为研究变定常渗流理论提供了有效手段,使得描述变定常渗流的数学模型得以改进,高效率应用计算方法得以建立,结果必然是理论概括更加贴近于矿场实际。其三,由于能源开发的重要性,某些工程领域发展迅速,为渗流理论的应用提供广阔天地。就石油工业来说,增加原油产量和可采储量具有战略意义,水力压裂、油井酸化、注聚合物等新技术、新工艺应运而生,它们的每次成功应用几乎都引发出—批渗流力学新课题。工程师们为估算水力压裂所产生的裂缝长度而研究了有水力裂缝的二维椭圆渗流理论,为分析油井酸化效果而发展了复合介质渗流理论,为预测聚合物的驱油效果而探讨了非牛顿流体渗流理论等等,油气藏开发工程成为变定常渗流理论最广阔的应用领域之一。

20 世纪 80 年代中期至 90 年代以来,先是水平井的三维渗流理论研究热潮应运而生,成

就斐然(王晓冬,1998),后又有分形理论应用于多孔介质描述和不稳定渗流过程,为渗流力学理论的发展增添了新内容。而精细地质建模和油藏数值模拟的结合,将有可能为处于开发中后期的油田保持产量或延缓产量递减提供较为可靠的理论依据。另有其他一些非线性不定常渗流问题,如凝析气渗流问题、流固耦合渗流问题、多孔介质中热对流问题等亦逐渐引起了研究人员的注意,并取得了一些有特色的成果(郎兆新,2001;葛家理等,2003)。随着时间的推移,这些复杂渗流问题的研究成果必将加深渗流理论的研究深度,拓宽渗流力学的应用广度。但是,地下渗流理论的发展需要准确描述复杂的渗流过程,而物理实验是揭示这一复杂的渗流过程的最有力手段。可是,由于长期以来人们忽视或者不重视基本物理实验,这正是20世纪中叶过后渗流力学理论(不是数学表现方法)发展减缓的直接原因。

0.4 渗流理论的发展路线

渗流理论的发展路线可以概括为以下几条:重视物理实验、创立理论概念和解决潜在的渗流问题是推动渗流力学发展的直接途径;深入矿场实际、调查异常的矿场资料、提炼出切合实际的新问题、尝试新方法常常能够给渗流力学注入新鲜血液;专家学者们注重归纳和总结、导出新结论,经常提供一些解决目前实践中尚未出现的问题的论著,这样既为后来者铺陈,又供同代人参考;与不断发展的现代化手段相结合,深化已有的研究结果,推陈出新,例如有NMR,我们便可能观测到 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 体元内流体的渗流速度,便可能更深地理解渗流过程;积极与其他边缘学科相结合,交叉渗透、开拓创新,例如当多相管流的研究不能对井筒流体相变过程给出一个综合的动力学模型时,定向井渗流力学数学模型便得不到一个合适的内边界条件,而一个简单的带有局限性和经验色彩的Fair井筒相变模型却能够对压力异常现象进行初步分析。

0.5 结 语

回顾与总结让我们领略到渗流力学内涵的深邃,让我们感觉整个学科发展的脉搏。现代油气田开发越来越注重科学地认识和改造油气藏,尊重客观规律,以最低成本获得最多的油气,这需要地下渗流力学,需要依据渗流力学等基础理论而开发的各项高新技术。发展渗流力学要注意观察和发现实际应用中的问题,要重视利用高精密仪器进行基础试验,要各方面人才共同努力。诚如黑格尔所说:“规律的王国是现存世界或现象世界的静止的反应”。至今,渗流力学的学科已经形成,但我们所认识的渗流规律并不完善,只是对渗流现象的不完全的、近似的反应,还停留在宏观的、平均的水平。像爱因斯坦相对论突破牛顿经典力学理论一样,渗流力学期待着新的进步。

附录A 流体力学简介

力学:力学是一门古老的学科,在西方可上溯至公元前4世纪的古希腊学者柏拉图(天体圆运动)和亚里士多德(力产生运动),在中国可上溯至公元前5世纪的墨子(杠杆原理)。在一定意义上力学是整个物理学的基础,可分为流体力学、固体力学和一般力学。

牛顿力学:1564~1642年,在Galileo Galilei论述惯性运动之后,力学成为一门科学理论。

Isaac Newton(1642~1727)在1687年出版了《自然哲学的数学原理》,其中系统阐述了牛顿三大定律,标志着经典力学的完善。

流动和流体:在力的作用下一切物质都将产生变形。如果力撤除后物质变形消失,这种变形叫做弹性变形;如果力撤除后物质变形永久存在,这种变形叫做塑性变形;如果在无论多么小的力的作用下,物质的变形都不断增加、无限地增加,这样的变形叫做流动。流体就是流动的物质。

1686年,Newton完成了著名的粘性流动实验,发现几乎所有的普通流体其流动阻力与速度梯度成线性关系,即满足牛顿内摩擦定律,这是对流体粘性的理性认识,为纪念牛顿,称这样的流体为牛顿流体。

流体力学简史:18世纪30年代英国工业革命促进了生产力的空前发展。历史上,流体力学曾经一度沿着理论途径和实验途径两种不同路线发展。

1738年,D. Bernoulli(1700~1783)提出 Bernoulli 方程。

1755年,Leonhard Euler(1707~1783)提出不考虑粘性的理想流体流动方程,稍后 Pierre - Simon Laplace(1749~1827)、Joseph - Louis Lagrange(1736~1813)等把理想流体运动的研究推向了新的高峰,对于理想流体流动的描述已逐渐达到完美的程度。但理想流动方程的解往往与实验结果和真实流动实际相差甚远。

1752年,Jean Le Rond d'Alembert(1717~1783)发表了著名的 d'Alembert 佯谬:在一个无界、理想不可压缩流体中,物体作匀速直线运动时的阻力为零。在实际应用中,像 d'Alembert 佯谬这样的结论是矿场工程师们所不能接受的。为解决生产和技术发展中出现的流体力学问题,工程师们发展了另一门高度经验性的流体力学分支——水力学(Hydraulics)。

1821年,Claude - Louis - Marie - Henri Navier(1785~1836)等人开始考虑将分子间的作用力加入到 Euler 方程中。1845年,George Gabriel Stokes(1819~1903)将这个分子间的作用力用粘性系数来表示,并正式完成了 Navier - Stokes 粘性流体力学基本方程,奠定了近代粘性流体力学基础。N - S 方程具有强非线性,只有少数的简单流动能够进行求解,而完整的数学求解困难很大。因此到19世纪末,理论流体力学和实验流体力学仍然各自独立发展。

1880年,O. Reynolds 提出一个对于流动有决定性影响的无量纲参数——Reynolds 数,理论流体力学和实验流体力学分道扬镳的局面才有所改观。在1880~1883年间,Reynolds 进行了大量的实验研究,发现层流向湍流转变的雷诺数为1800~2000之间。

1904年,德国工程师 Ludwig Prandtl(1875~1953)提出了一个创新设想——边界层理论。边界层理论认为:在雷诺数很大的情况下,粘性的作用主要局限于绕流物体或其他流动边界的固体壁面附近很薄的一层流动中,这个薄层被称为边界层,边界层外部流动可以按理想流动处理。根据边界层理论能够克服在粘性流动方程求解中数学上的困难,从根本上解决了流动阻力和能量损失这样的重大粘性流动问题。边界层理论的提出使得理论的和实验的流体力学完美结合起来,使流体力学得到划时代的发展。

1907年,Н. Е. Жуковский(茹科夫斯基,1847~1921)出版《空气动力学》,他对机翼理论和机翼设计做出杰出贡献,发明了以他命名的机翼;另一位近代空气动力学家 Lanchester(1868~1945)对近代飞行理论也做出了重要贡献。

1914年 E. Buckingham 提出量纲分析方法,为分析解决工程问题提供一种有利工具。

参考文献

- 陈钟祥. 1974. 渗流力学的近况动向和展望. 力学学报, 17(1)
- 陈钟祥. 1974. 渗流力学的近况动向和展望(续). 力学学报, 17(2)
- 陈钟祥. 1981. 渗流力学——高效率开发油气田的科学基础和重要工具. 力学与实践, (2)
- 葛家理, 刘月田, 姚约东. 2003. 现代油藏渗流力学原理(下册). 北京: 石油工业出版社
- 郭尚平, 刘慈群. 1964. 非均质油田开发过程的水动力学计算方法. 力学学报, 7(2)
- 郭尚平, 刘慈群, 阎庆来, 等. 1981. 渗流力学的近况和展望. 力学与实践, (3)
- 科钦娜 П Я. 1964. 地下水动力学. 萧丹森等译. 北京: 地质出版社
- 克利门托夫 П П. 1957. 地下水动力学. 长春: 长春地质勘探学院出版社
- 孔祥言, 陈峰磊, 陈国权. 1999. 非牛顿流体渗流的特性参数及数学模型. 中国科技大学学报, 29(2)
- 郎兆新. 2001. 油气地下渗流力学. 北京: 石油工业出版社
- 刘慈群. 1956. 根据注水实验资料计算渗透系数的新公式. 水力发电, (11)
- 刘慈群. 1958. 在透水性沿着水平方向急剧变化的岩层中地下水向完整井流动的研究. 力学学报, 2(4)
- 刘慈群. 1959a. 在挠褶型或单斜型自流盆地中井的产量计算. 北京地质学院学报, (4)
- 刘慈群. 1959b. 渗透系数对油井产量影响的计算公式. 北京大学学报, (1)
- 刘慈群. 1959c. 在半无限双层含水层中排水管列的渗流计算. 北京大学学报, (2)
- 刘慈群, 韩得礼. 1983. 用数值反演研究多重介质不完善井的压力变化性质. 石油勘探与开发, (1): 49 ~ 54
- 罗焕炎等. 1988. 地下水运动的数值模拟. 北京: 中国建筑工业出版社
- 钱家欢, 殷宗泽. 1980. 土工原理与计算. 北京: 中国水利水电出版社
- 王晓冬. 1998. 水平井不定常渗流研究: [学位论文]. 北京: 中国科学院渗流流体力学所
- 谢尔加乔夫 В Н. 1955. 地下水力学. 北京石油学院译. 北京: 燃料工业出版社
- 张忠胤. 1955. 计算倾斜隔水层潜水均匀运动的新方法. 地质学报, 36(2)
- Aronofsky J S, Jenkins R. 1954. A Simplified Analysis of Unsteady Radial Gas Flow. Trans AIME 201: 149 ~ 154
- Bear J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier Publishing Co
- Buckley S E, Leverett M C. 1942. Mechanism of Fluid Displacement in Sands. Trans AIME 146: 107 ~ 116
- Carslaw H S, Jaeger J C. 1959. Conduction of Heat in Solids, 2nd. Oxford at the Clarendon Press
- Darcy H. 1856. Les Fontaines Publique de la ville de Dijon. Paris: Victor Dalmont as reprinted by Hubbert M
- Earlougher C R, Kersch M K. 1972. Field Examples of Automatic Transient Test Analysis. JPT, (10): 1271 ~ 1277
- Forchheimer P. 1901. Wasserbewegung durch Boden. Z Ver Deutsch Ing, 45: 1781 ~ 1788
- Higgins R V, Leighton A J. 1962. A Computer Method of Calculating Two - Phase Flow in Any Irregularly Bounded Porous Media. JPT, (6): 679 ~ 683
- Higgins R V, Leighton A J. 1963. Principles of Computer Techniques for Calculating Performance of a Five - Spot Waterflood Two - Phase Flow. RI 6305, USBM

- Higgins R V, Leighton A J. 1964. Aids to Forecasting The Performance of Waterfloods. JPT, (9):1076
- Higgins R V, Leighton A J. 1967. Computer Techniques for Predicting Three - Phase Flow in Five - Spot Waterfloods. USBureau of Mines Report of Investigations (8):7011
- Horne R N. 1992. Advanced in Computer - Aided Well Test Interpretation. Paper SPE 24731
- Hurst W. 1934. Unsteady Flow of Fluids in Oil Reservoirs. Physics, 5 (1):20 ~ 30
- Klinkenberg L J. 1941. The Permeability of Porous Media to Liquid and Gases. API Drilling and Production Practice. 200 ~ 213
- Leverett M C. 1939. Flow of Oil - Water Mixtures Through Unconsolidated Sands. Trans AIME 132:149
- Leverett M C, Lewis W B. 1941. Steady Flow of Gas/Oil/Water Mixtures Through Unconsolidated Sand. Trans AIME 142:107 ~ 116
- Muskat M. 1934. The Flow of Compressible Fluid through Porous Media and Some Problems in Heat Conduction. Physics 5 (3):71 ~ 94
- Muskat M. 1937. The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media. New York: McGraw - Hill Book Co
- Peaceman D W. 1977. Fundamentals of Numerical Reservoir Simulation. New York: Elsevier Scientific Publishing Co
- Peaceman D W. 1978. Interpretation of Well - Block Pressure in Numerical Reservoir Simulation. SPEJ 18 (6):183 ~ 194
- Ramey H J Jr. 1976. Practical Use of Modern Well Test Analysis. Paper SPE 5878
- Ramey H J Jr. 1990. Advance in Practical Well Test Analysis. Paper SPE 20592
- Stehfest H. 1970. Numerical Inversion of Laplace Transforms. Com of ACM 13(1):47 ~ 49
- Stone H L. 1970. Probability Model for Estimating Three - Phase Relative Permeability. JPT 24 (2): 214 ~ 218
- Stone H L. 1973. Estimating Three - Phase Relative Permeability and Residual Oil Data. JCPT 12 (10 - 12):53 ~ 61
- Theis C V. 1935. The Relationship Between the Lowering of Piezometric Surface and Rate and Duration of Discharge of Wells Using Ground - Water Storage. Trans AGU II:519
- Thomas L K, Lumkin W B, Recheis G M. 1976. Reservoir Simulation of Variable Bubble - point Problem. SPEJ 16 (2):10 ~ 16
- van Everdingen A F and Hurst W. 1949. The Application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs. Trans AIME 186:305 ~ 324
- Watts J W. 1997. Reservoir Simulation: Past, Present, and Future. Paper SPE 38441
- Wyckoff R D, Botset H G. 1936. The Flow of Gas - Liquid Mixtures Through Unconsolidated Sand. Physics(7):325

第 1 章 基本概念和基本定律

我们从日常观察知道,在不同的条件下,流体运动的状态千差万别。控制流体运动行为的基本物理定律是众所周知的质量守恒定律和 Newton 运动定律、某些情况下再加上热力学定律。这些定律本身的表述比较简洁,但它们的各种推论可以形成错综复杂的结果,这些结果有时不可能通过直观的流动图案表示出来,需要在基本定律和实验结果的基础上建立一个复杂的概念和理论体系。

尽管如此,自然界中大部分的力学问题还是具有不可测性。

1.1 基本概念

本章阐述渗流力学的基本概念和基本定律,有多孔介质的一般性质、渗流和渗流力学、油气储集层、线性和非线性渗流定律以及各种守恒方程。

1.1.1 多孔介质

多孔介质是含有大量空隙的固体材料,简洁概括什么是多孔介质其实是比较困难的,但可以根据多孔介质的特性给出其描述性的定义。

多孔介质的具体描述:多孔介质(Porous Media)为多相物质所占据的一部分空间,其固体部分称为固体骨架,而其余部分称为孔隙空间;孔隙内可以是单相气体或液体,也可以是多相流体,至少某些孔隙空间构成相互连通的通道;固体骨架、孔隙和通道应当遍及整个多孔介质所定义的空间。

多孔介质的一般性质:多孔介质具有储容性,能够储集和容纳流体;具有渗透性,允许流体在孔隙中流动;具有润湿性,岩石孔隙表面与流体接触中所表现的亲和性;具有大的比表面,单位体积岩石孔隙的总内表面积有时相当大;具有非均质性,平面上和纵向上物理性质时常差异明显,孔隙结构狭窄而复杂。

多孔介质的非均质特性:如果多孔介质的渗流力学性质(如储容性)与位置相关,即某点的性质明显与另外点不同,则称为非均匀介质,如果多孔介质的渗流力学性质与方向相关,即某方向的性质明显与另外方向不同,则称为各向异性介质。由此又可将多孔介质简单分为:非均匀介质、均匀各向同性介质和均匀各向异性介质。

1.1.2 渗流和渗流力学

渗流:渗流(Fluid Flow in Porous Media)是流体通过多孔介质的流动。其流体是符合牛顿剪切定律的气体、液体、气—液混合物等普通牛顿流体以及部分具有简单流变方程的非牛顿流体(牛顿流体可谓是粘度为常数的流体,其常数的意义指的是粘度与速度场无关,但可以是温度的函数)。

在渗流过程中,多孔介质表面作用明显,流体流动过程中任何时候必须考虑粘性的作用;地下渗流中通常具有较高的压力,压力变化亦比较明显,需要考虑流体和介质的压缩性;孔道结构复杂,有时需要考虑毛管力的作用;某些情况下还需要考虑吸附、解吸、弥散等物理化学

作用。

渗流力学:渗流力学(Mechanics of Fluid Flow in Porous Media)是研究流体在多孔介质中运动规律的科学。渗流力学是流体力学的一个独立分支,是流体力学与岩石力学、多孔介质理论、表面化学和物理化学以及生物学交叉渗透而形成的,是一门应用基础学科。

研究流体渗流过程的方法有流体力学方法、水动力学方法和实验方法。流体力学方法用严格的数学语言来描述流体运动规律,将实际问题抽象为具体的数学模型,追求问题的精确解;水动力学方法则针对某些比较复杂的实际问题,将流体力学的某些结论与实验或试验观察结果相结合,采用数理分析等统计方法,力求做出定量的解释,给出能够满足工程实际要求的近似解;实验方法是在复杂渗流条件下,理论上常常不能解决具体问题,通过实验模型模拟实际渗流发生的条件和过程,以确定流体渗流的规律。

渗流系统:一般情况下,渗流力学只研究所关心的多孔介质的一部分,称这部分多孔介质地层为渗流系统(System of Porous Flow),称其余部分为渗流环境(Circumstance of Porous Flow)。如果渗流系统和渗流环境之间有自由的质量和能量交换,则这种渗流系统为敞开系统(Open System);如果渗流系统和渗流环境之间没有质量和能量交换,称这种渗流系统为封闭系统(Closed System)。

1.1.3 油气储集层

油气储集层:油气储集层是一种天然的地下地质异常体,由岩石和流体组成,岩石孔隙或裂隙中至少含有一种液相或气相碳氢化合物。油气储集层具有储容性和渗透性并含有水,形成于数百万年之前,是一个特殊的物理系统,其初始状态是唯一、有限的,而最终状态是相对确定的,取决于经济开采极限。现代油气生成学说认为,富含水生动植物的烃类物源在一定条件下可生成油气,在毛管力和浮力的作用下经过运移后储集于圈闭构造中。

油气藏:油气藏是一个独立的油气储集和流动空间区域,如图 1-1-1 所示。

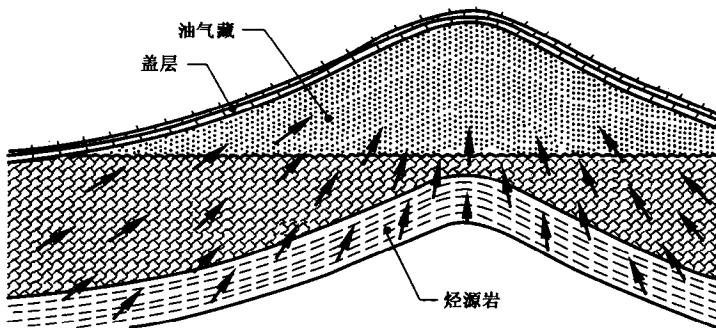


图 1-1-1 油气藏示意图

对油气藏的分类方法有数种,若按其几何形状可分为层状油气藏和块状油气藏两大类。

层状油气藏通常存在于海相沉积和内陆盆地沉积当中,有多层和单层之分,多层的层间有夹层;块状油气藏通常是灰岩或白云岩油气藏,有很大的厚度。油气藏通常有复杂的内部结构和不规则外部形状。

有些教科书上将油气藏的内部分为 3 种介质、7 种结构。3 种介质是单一介质、双重介质、三重介质;7 种结构是孔隙、裂缝、溶洞、裂缝—孔隙、溶洞—孔隙、裂缝—溶洞、裂缝—溶洞—