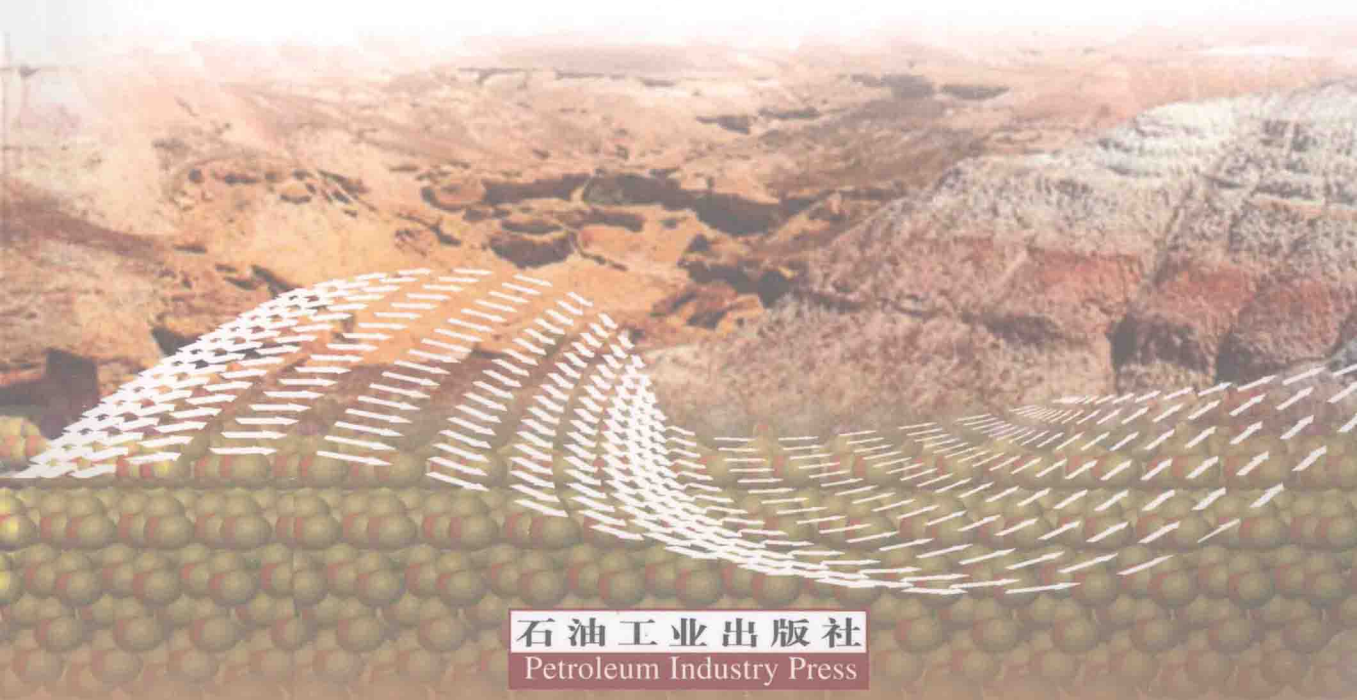




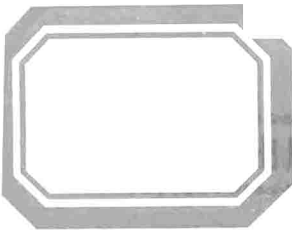
石油高等院校特色教材

渗流力学与渗流物理

陈军斌 王 冰 张国强 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press



版基金资助项目

石油高等院校特色教材

渗流力学与渗流物理

陈军斌 王 冰 张国强 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是在油气渗流力学的理论基础上,遵循由浅入深的认识规律,详细介绍了渗流力学与渗流物理的基础知识和基本定律,稳态和非稳态渗流,源函数与格林函数,孔隙介质中的非混相驱替,裂缝性油藏、煤层气和页岩气的渗流规律,以及低渗透油藏注气提高采收率的数值模拟研究。

本书可作为石油与天然气工程、石油地质、地下水工程、油田化学等专业研究生教材,也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

渗流力学与渗流物理/陈军斌,王冰,张国强编著.

北京:石油工业出版社,2013.7

(石油高等院校特色教材)

ISBN 978-7-5021-9588-5

I. 渗…

II. ①陈…②王…③张…

III. 油气藏-渗流力学-高等学校-教材

IV. TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 096754 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:<http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010)64523579 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:18.5

字数:472 千字

定价:36.00 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

“渗流力学与渗流物理”是石油与天然气工程学科研究生的一门重要课程,是从事油气田开发工程研究方向研究生的一门必修课程,内容涉及数学、物理、化学、力学、相态、地质、油藏等多学科,理论性强,逻辑性严密,难度大,对学生的知识要求高。因此,编写与此课程相配套的研究生教材,对于提高这门课程的教学质量和教学效果是十分必要的。

本书是在作者的《渗流力学与渗流物理》研究生讲义基础上编写而成的,同时参考了曾经作为李璠教授“渗流力学与渗流物理”研究生课程辅导教师时的课堂笔记,陕西省教育厅重点实验室研究课题“低渗透油藏注气(氮气、二氧化碳)提高原油采收率技术研究”的部分科研成果,在美国科罗拉多矿业学院石油工程系做访问学者期间旁听以下研究生课程时的课堂笔记及任课老师的多媒体课件——NATURALLY FRACTURED RESERVOIR (Hossein Kazemi 教授)、RESERVOIR ENGINEERING PRINCIPLE (Yu Shu WU)、APPL MATH FLUID FLOW POROUS MEDIA (Erdal Ozkan 教授)、PHASE BEHAVIOUR IN OIL/GAS INDUSTR (Xiaolong Yin 教授)、GEOMECH-UNCONVENTIONAL RESOURCE (Azra N. Tutuncu 教授)、SHALE RESERVOIR ENGINEERING (Erdal Ozkan 教授, Azra N. Tutuncu 教授),国内孔祥言教授、郎兆新教授、葛家理教授、翟云芳教授、张建国教授、程林松教授、王晓冬教授等的相关教材及教学研究成果。

本书第一章由王冰高级工程师编写,第八章由张国强博士编写,其余章节由陈军斌教授编写。在编写过程中,始终坚持课程组专家李璠教授对渗流力学教材编写所要求的编写原则: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,又有本书的独到之处;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谨与完整,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传授;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,但自知由于学识和文

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。

在书稿完成之际,我要十分感谢美国科罗拉多矿业学院石油工程系尹小龙(Xiaolong Yin)博士的邀请以及国家留学基金委的委派,使自己能够有一年的时间在美国科罗拉多矿业学院访问研究,定下心来学习、修改、补充和完善原有的《渗流力学与渗流物理》讲义;我要十分感谢科罗拉多矿业学院石油工程系博士研究生熊毅同学为第六章部分内容所提供的素材;我要十分感谢上面所提及的各位专家、教授以及后面在参考文献中所提及的专家、同行;我也要十分感谢中国石油天然气集团公司勘探开发研究院廊坊分院孙贺东博士在本书编写过程中所给予的无私帮助。

同时,我还要十分感谢石油工业出版社对我校在建设渗流力学精品课程系列教材方面的大力支持及无私帮助;感谢陕西省教育厅重点实验室研究基金的资助。

最后,我要感谢在编写过程中我的研究生马镐、杨兴东、双立娜、吴亮、王华军、张骏、许琳、伍亚军、尹虎琛、杨磊等同学在收集资料、文字编辑、校稿等方面所付出的辛勤劳动。

由于水平有限,书中的错误和不足之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

陈军斌

2013年3月

目 录

第一章 渗流的基础知识和基本定律	1
第一节 基本概念	1
第二节 渗流过程中的力学分析及油藏驱动方式	2
第三节 连续介质	5
第四节 状态方程	7
第五节 渗流的基本定律——达西定律	8
第六节 热力学有关概念	16
第七节 菲克扩散定律	18
第八节 等温吸附方程	20
第九节 多相渗流的基本知识	21
第十节 相态方程	28
第十一节 连续性方程	33
第十二节 能量守恒方程	37
第十三节 油气渗流的数学模型	39
习题	43
第二章 稳态渗流理论	45
第一节 渗流的最基本形式	45
第二节 非均质地层稳态渗流理论	53
第三节 直线井排及直线边界问题	59
第四节 保角变换法	77
第五节 等值渗流阻力法	91
习题	105
第三章 非稳态渗流理论	107
第一节 理想系统非稳态渗流问题	107
第二节 特殊非稳态渗流问题	114
第三节 矩形系统非稳态渗流问题	129
习题	135
第四章 源函数和格林函数	137
第一节 扩散方程的源函数解	137
第二节 非稳态渗流问题的格林函数及源函数法	146
第三节 拉普拉斯空间中源函数在解决非稳态渗流问题的应用简介	156
习题	169
第五章 孔隙介质中的非混相驱替	171
第一节 有动界面的不可压缩流体流动	171
第二节 有动界面的可压缩流体流动	177

第三节	油水两相渗流·····	181
第四节	二维系统(x, z)中的驱替·····	193
第五节	拟相对渗透率与毛细管压力曲线·····	201
第六节	底水锥进问题·····	205
习题	·····	207
第六章	裂缝性油藏渗流规律·····	210
第一节	基本概念和数学描述·····	210
第二节	双重孔隙介质渗流问题数值解·····	212
第三节	双重孔隙介质渗流问题解析解·····	223
第四节	双重渗透介质渗流问题·····	226
第五节	双重孔隙介质三相流动模型·····	232
第六节	三重孔隙介质渗流模型·····	233
习题	·····	234
第七章	煤层气及页岩气渗流规律·····	235
第一节	煤层气渗流规律·····	235
第二节	页岩气渗流机理·····	245
习题	·····	254
第八章	低渗透油藏注气提高采收率数值模拟研究·····	255
第一节	注气提高采收率机理及数值模拟理论基础·····	255
第二节	注气相态实例模拟研究·····	264
第三节	注气提高采收率数值模拟实例研究·····	267
第四节	结论·····	280
习题	·····	281
附录	·····	282
附录一	误差函数·····	282
附录二	指数幂积分函数·····	282
附录三	Laplace 变换及其反演·····	283
附录四	修正 Bessel 函数·····	285
参考文献	·····	287

第一章 渗流的基础知识和基本定律

第一节 基本概念

一、渗流与渗流力学

渗流是流体在多孔介质中的流动。渗流力学就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重要分支,是流体力学与多孔介质理论、表面物理、物理化学以及生物学交叉渗透而发展起来的一门边缘学科。

渗流现象普遍存在于自然界和人造材料中,如地下水、热水和盐水的渗流,石油、天然气和煤层气的渗流,动物体内的血液微循环和微细支气管的渗流,植物体内水分、气体和糖分的输送,陶瓷、砖石、砂模、填充床等人造多孔材料中气体的渗流等。

渗流力学在很多应用科学和工程技术领域有着广泛的应用,如土壤力学、地下水文学、石油工程、地热工程、给水工程、环境工程、化工和微机械等。此外,在国防工业中,如航空航天工业中发汗冷却、核废料的处理以及诸如防毒面罩的研制等都涉及渗流力学。本书着重论述有关油、气、水渗流的某些基本理论及其应用。

渗流的特点在于:

- (1)多孔介质单位体积孔隙的表面积比较大,表面作用比较明显,任何时候都必须考虑黏性作用;
- (2)在地下渗流中往往压力较大,因而,通常要考虑流体的压缩性;
- (3)孔道形状复杂,阻力大,毛细管力作用较普遍,有时还要考虑分子力;
- (4)往往伴随着复杂的物理化学过程。

渗流力学是一门既有较长历史又年轻活跃的科学。从达西 Darcy 定律的出现已过去一个半世纪。20 世纪,石油工业的崛起极大地推进了渗流力学的发展。随着相关科学技术的发展,如高性能计算机的出现,核磁共振、CT 扫描成像以及其他先进试验方法用于渗流,又将渗流力学大大推进了一步。近年来,随着非线性力学的发展,将分叉、混沌以及分形理论用于渗流,其他诸如格子气模型的建立等,更使渗流力学的发展进入一个全新的阶段。

二、多孔介质

简单说来,多孔介质是指含有大量孔隙的固体,也就是说,是指固体材料中含有孔隙、微裂缝等各种类型毛细管体系的介质。由于要从渗流的角度定义多孔介质,还需要规定从介质一侧到另一侧有若干连续的通道,并且孔隙和通道在整个介质中有着广泛的分布。概括起来,可用以下几点来描述多孔介质:

- (1)多孔介质(或多孔材料)是多相介质占据一块空间,其中固相部分称为固体骨架,而未被固相占据的部分空间称为孔隙。孔隙内可以是气体或液体,也可以是多相流体。
- (2)固相应遍布整个介质,孔隙也应遍布整个介质。也就是说,在介质中取一适当大小的

体元,该体元内必须有一定比例的固体颗粒和孔隙。

(3)孔隙空间应有一部分和大部分是相互连通的,且流体可以在其中流动,这部分孔隙空间称为有效孔隙空间,而不连通的孔隙空间或虽然连通但属死端孔隙的这部分空间是无效孔隙空间。对于流体通过孔隙的流动而言,无效孔隙空间实际上可视为固体骨架。

三、油气储层

凡是可以储集和渗滤流体的岩层,称为储层。能够储存和渗滤油气的岩层,必须具有储存空间(孔隙性),储存空间有一定的连通性(渗透性)。储层中可以阻止油气向前继续运移,并在其中储存聚集起来的一种场所,称为圈闭或储油气圈闭。

具有连通孔隙、能使流体储存并在其中渗滤的岩层,也称储集岩。它是构成油气藏的基本要素之一。储层必须具备储存石油和天然气的空间和能使油气流动的条件。如储层中储存了油气,则称含油气层。绝大多数油气藏的含油气层是沉积岩(主要是砂岩、石灰岩、白云岩),只有少数油气藏的含油气层是岩浆岩和变质岩。储层是控制油气分布、储量及产能(给出石油、天然气的能力)的主要因素。

根据研究目的及油田生产实践的需要,对储层有各种分类方法。

(1)按岩类分为碎屑岩储层、碳酸盐岩储层、特殊岩类储层(包括岩浆岩、变质岩、泥质岩等);

(2)按储集空间类型分为孔隙型储层、裂缝型储层、孔缝型储层、缝洞型储层、孔洞型储层、孔缝洞复合型储层;

(3)按渗透率的大小分为高渗储层、中渗储层、低渗储层。

储层按介质类型和组合结构可分为三种介质七种结构,即:

(1)单重介质:粒间孔隙结构、纯裂缝结构、纯溶洞结构。

(2)双重介质:裂缝—孔隙结构、溶洞—孔隙结构、裂缝—溶洞结构。

(3)三重介质:孔隙—裂缝—溶洞结构。

对于砂岩油藏,地下流体常常储集在各种构造中,最常见和最典型的构造是背斜构造。

第二节 渗流过程中的力学分析及油藏驱动方式

一、力学分析

1. 流体的重力和重力势能

具有一定质量的流体受地心引力而产生重力,表现为位能。重力用公式表示为

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

式中 ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, m^2/s ;

z ——标高, m 。

在流体渗流过程中,重力是动力还是阻力取决于相对位置。

2. 流体的惯性力

惯性是由质量决定的一种物理性质,它总要使流体运动其维持原状。惯性的大小用惯性

力表示。惯性力用公式表示为

$$p_v = 10^{-6} \rho v^2 \quad (1-2-2)$$

式中 p_v ——惯性力, MPa;

ρ ——流体密度, kg/m³;

v ——渗流速度, m/s。

在渗流过程中, 通常液体渗流速度比较小, 惯性力一般可以忽略。

3. 流体的黏度和黏滞力

流体流动时流动层之间产生内摩擦, 就产生了黏滞力, 用公式表示为

$$F = \mu A \frac{dv}{dy} \quad (1-2-3)$$

式中 F ——黏滞力, N;

μ ——与流体性质有关的比例系数, 称为动力黏性系数, mPa·s;

A ——作用面积, m²;

$\frac{dv}{dy}$ ——速度梯度, 即在垂直于该速度方向上的变化率。

式(1-2-3)表明, 流体在流动过程中流体层间所产生的剪应力与法向速度梯度成正比, 与压力无关。流体的这一规律与固体表面的摩擦力规律不同。应当指出, 式(1-2-3)只能适用于流体做层状运动的情况, 即所谓的层流运动。在流体渗流过程中, 黏滞力总是阻力。

4. 岩石及流体的压缩性和弹性力

在开采过程中, 地层压力逐渐降低, 岩石及流体发生膨胀释放弹性能, 即弹性力产生作用。弹性力在驱油过程表现为动力。

5. 毛细管压力

毛细管压力大小与界面张力及界面曲率有关, 方向与岩石表面的润湿性有关。

1) 当油水接触面为形状简单的弯曲面

$$p_c = \sigma \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \quad (1-2-4)$$

式中 p_c ——曲面的附加压力(压强), MPa;

σ ——两相界面张力, N/m;

r, r' ——任意曲面的两个主曲率半径(即相互垂直的两相交切面内的曲率半径), μm 。

方程(1-2-4)是研究毛细管现象的一个最基本公式。应用式(1-2-4)的关键是确定不同曲面下的 r, r' 值。这种曲面附加压力只有在细小的毛细管中才值得重视, 因此人们常将这种附加压力称为毛细管压力。

2) 单根毛细管, 油水接触面为球面

$$p_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (1-2-5)$$

式中 p_c ——曲面的附加压力(压强), MPa;

θ ——润湿接触角;

r ——毛细管半径, μm 。

毛细管压力 p_c 指向弯曲面内侧, 即指向非润湿相一方。

公式(1-2-5)是研究毛细管压力最重要、最常用的公式。式(1-2-5)表明, p_c 与毛细管

半径 r 成反比:毛细管半径越小,毛细管压力越大。两相界面张力越大,接触角越小(越容易润湿),则毛细管压力也越大。

3)单根毛细管,油水接触面为柱面

$$p_c = \frac{\sigma}{r} \quad (1-2-6)$$

毛细管压力 p_c 指向管心,其作用是使毛细管中水膜增厚。

二、与油藏有关的压力概念

(1)原始地层压力:油田还没有投入开发,在探井中测得的油层中部压力,用 p_i 表示。

(2)供给边界压力:油气藏中存在液源供给区时,在供给边缘上的压力,用 p_e 表示。

(3)地层静压(目前地层压力):油井在关井后,待压力恢复到稳定状态时所测得的油层中部压力,简称静压。在油田开发过程中,静压是衡量地层能量的标志。静压的变化与注入和采出油、气、水的体积有关。

(4)井底压力:油井在生产过程中所测得的井底油层中部的压力,也常称为流动压力,简称流压,用 p_w 表示。

(5)折算压力:将油藏中某一点的压力折算到由基准面开始算起的压力,用 p_r 表示,即

$$p_r = p + \rho g z$$

折算压力表示油层中各点液体具有的总能量。在折算压力的计算中,通常取原始油水界面为基准面。

在渗流规律研究中,直接使用折算压力,就不必考虑油层深度的影响,简化了理论推导和计算公式。在静止流体内部各点的折算压力相等。

三、油藏的驱动方式

驱动方式是指在石油开采过程中油藏依靠哪一种能量为主来驱油,分为弹性驱动、溶解气驱动、水压驱动、气压驱动、重力气驱。驱动方式不是一成不变的,随驱油能量来源的变化而变化。

1. 弹性驱动

在油藏无边水或底水又无水顶,且原始油层压力高于饱和压力时,随着油层压力的下降,依靠油层岩石和流体的弹性膨胀能驱油的方式称为弹性驱动。

形成条件:(1)油藏无原生气顶;(2)油藏无边水(底水或注入水),或有边水但不活跃;(3)开采过程中油藏压力应始终高于饱和压力。

2. 溶解气驱动

在弹性驱动阶段,当油层压力下降至低于饱和压力时,随着油层压力的进一步降低,原来处于溶解状态的气体将分离出来,气泡的膨胀能将原油驱向井底,这种驱动方式称为溶解气驱动。就驱动机理来说,溶解气驱动也属于弹性驱动的一种,但其弹性能主要来自气泡的膨胀,而不是来自液体和岩石的膨胀。

形成条件:(1)气泡膨胀将油驱向井底,气泡膨胀驱动能量为主要驱动能;(2)油藏无边水(底水或注入水)、无气顶,或有边水而不活跃;(3)地层压力低于饱和压力。

3. 水压驱动

当油藏与外部的水体相连通时,油藏开采后由于压力下降,使周围水体中的水流入油藏进

行补给,这种驱动方式称为水压驱动。

形成条件:(1)有边底水(或注入水);(2)有露头。

水压驱动:分为刚性水驱和弹性水驱,或边水驱动和底水驱动(按油藏类型和油水分布产状)。

4. 气压驱动

气压驱动的油藏以存在一个较大的气顶为前提,在开采过程中,从油藏中采出的油量由气顶中气体的膨胀而得到补给。由于气顶的存在,油藏往往是饱和油藏,所以气压驱动时往往或多或少地伴随一定程度的溶解气驱动。

形成条件:(1)有气顶;(2)无水压驱动或水压驱动很弱。

气压驱动分为刚性气驱动和弹性气驱动。

5. 重力驱动

对无原始气顶和边底水的饱和及非饱和油藏,当油藏储层的向上倾斜度比较大时,靠原油自身的重力将油驱向井底的驱动方称为重力驱动。

形成条件:(1)油层比较厚,倾角大;(2)渗透性好,开采后期。

第三节 连续介质

连续性假设是由物理学家欧拉在 1753 年提出来的,认为流体在充满着一种介质时不留任何自由空隙,既没有真空的地方,也没有分子的微观运动,把流体看作是连绵不断的不留任何自由空间的连续介质,如图 1-3-1 所示。

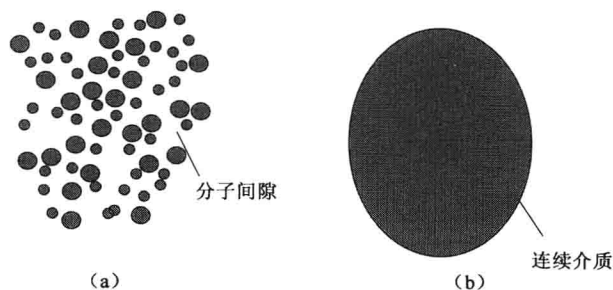


图 1-3-1 连续介质示意图

渗流力学不研究单独的流体质点的运动,而是在连续介质的假设前提下研究流体的宏观运动。

本节的连续介质包含连续流体和连续多孔介质两个部分。

一、流体质点—均质流体密度—连续流体

把流体看成一种具有连续的理想介质,实际上是假定流体在它所占据的空间中具有平滑变化的密度,即密度是一种连续函数。密度 ρ 是流体的质量 Δm 和它所占有的体积 ΔV 之比。在流体之中考虑一个数学点 M , 计算该点处的密度首先要选定所用的体积。如图 1-3-2 所示, L_1 与一个分子到它最邻近分子的平均距离成正比,约大于这个距离一个数量级; L_2 是与流动状况相关的一个典型长度。

密度的计算公式为

$$\rho(M) = \lim_{\Delta V_i \rightarrow \Delta V_0} \frac{\Delta m_i}{\Delta V_i} \quad (1-3-1)$$

$$\rho(M') = \lim_{M' \rightarrow M} \rho(M) \quad (1-3-2)$$

具有特征体积 ΔV_0 的数学点 M 叫做流体在 M 处的质点。显然,质点是“具有一定质量的点”。质点不能很大,和流体所占据的空间尺寸相比可以看作是“点”状,能够反映流体的局部性质,若过大可能导致平均值的增加或减少;质点又不能过小,必须包含足够量的分子,能够研究它们的宏观平均现象。

通过这种方法,由分子集合体组成的物质就为一种充满整个空间的连续介质所代替,即连续流体,简称流体。

二、多孔介质特征体元—孔隙度—连续介质

对多孔介质进行数学描述的基础定义是孔隙度,即岩块中孔隙体积占岩块总体积的分数。要定义多孔介质中某一点的孔隙度,首先必须选取体积。这个体积不能太小,应当包括足够的有效孔隙数;又不能太大,以便能够代表介质的局部性质。如图 1-3-3 所示,称体积 ΔU_0 为多孔介质在数学点 M 处的特征体元——多孔介质特征体元。这样的定义使得多孔介质成为在每个点上均有孔隙度的连续函数。

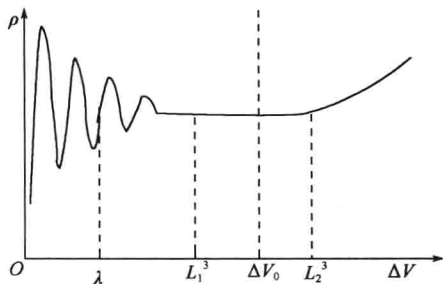


图 1-3-2 流体密度的定义

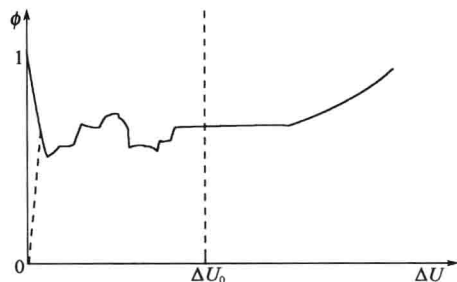


图 1-3-3 多孔介质孔隙度的定义

孔隙度的计算公式为

$$\phi(M) = \lim_{\Delta U_i \rightarrow \Delta U_0} \frac{(\Delta U_p)_i}{\Delta U_i} \quad (1-3-3)$$

$$\phi(M') = \lim_{M' \rightarrow M} \phi(M) \quad (1-3-4)$$

若这样定义的孔隙度与空间位置无关,则称这种介质对孔隙度而言是均匀介质,则孔隙度可简单定义为岩石的孔隙体积 V_p 与岩石体积 V 之比(以百分数表示),即

$$\phi = \frac{V_p}{V} \times 100\% \quad (1-3-5)$$

该孔隙度也称为绝对孔隙度。

自然界岩石的孔隙有连通孔隙和不连通孔隙。此外,孔隙的大小也是直接影响油气在其中流动的重要因素。

那些不连通的孔隙和微毛细管孔隙,对油气的储集是毫无意义的。只有那些彼此连通的超毛细管孔隙和毛细管孔隙,才是有效的油气储集空间,即有效孔隙。有效孔隙度 ϕ_e 是岩石

中的有效孔隙体积 V_e 占岩石体积 V 的百分数,即

$$\phi_e = \frac{V_e}{V} \times 100\% \quad (1-3-6)$$

砂岩有效孔隙度变化在 $5\% \sim 30\%$ 之间,一般为 $10\% \sim 20\%$;碳酸盐岩储层孔隙度小于 5% 。

岩石的孔隙按其大小(孔隙直径或裂缝宽度)可分为 3 类:

(1)超毛细管孔隙:管形孔隙直径大于 0.5mm 或裂缝宽度大于 0.25mm 的孔隙。这种孔隙中的流体可以在重力作用下自由流动。岩石中的大裂缝、溶洞及未胶结或胶结疏松的砂岩层孔隙大部分属此类。

(2)毛细管孔隙:管形孔隙直径介于 $0.5 \sim 0.0002\text{mm}$ 之间或裂缝宽度介于 $0.25 \sim 0.0001\text{mm}$ 之间的孔隙。在这种孔隙中的流体,由于毛细管力的作用,不能自由流动。要使流体在其中流动,需要有明显的超过重力的外力去克服毛细管阻力。一般砂岩的孔隙属于此类。

(3)微毛细管孔隙:管形孔隙直径小于 0.0002mm 或裂缝宽度小于 0.0001mm 的孔隙。要使这种孔隙中的流体流动,需要非常高的剩余压力梯度,这在地下油层条件下一般是达不到的。因此,这种孔隙对石油、天然气的开发无意义。一般泥岩、页岩中的孔隙属于此类。

孔隙度是标量,有线孔隙度、面孔隙度和体孔隙度之分。对于均匀介质,它们是相等的。区分孔隙类型非常重要,一种是相互连通的有效孔隙,另一种是相对孤立的、不连通的死孔隙,在不同的场合它们对渗流过程的贡献是不同的。

有了连续流体和连续介质这两个物理模型,就能够运用高等数学来研究流体在多孔介质中的渗流运动,就能够对真实的渗流过程作出合理的分析和解释。当然,连续流体和连续介质模型也是有局限性的。例如,流速超过某一极限速度,水流会出现掺气现象;压力小于汽化压力,会产生局部空化现象。在这些情况下,连续介质和连续流体模型不能原封不动地适用。

第四节 状态方程

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

$$C_L = -\frac{1}{V_L} \frac{\partial V_L}{\partial p} \quad (1-4-1)$$

在等温渗流过程中,公式(1-4-1)可以变为

$$C_L = -\frac{1}{V_L} \frac{dV_L}{dp} = \frac{1}{\rho_L} \frac{d\rho_L}{dp} \quad (1-4-2)$$

对于不可压缩流体,由于 $\frac{d\rho_L}{dp} = 0$,所以 $C_L = 0$ 。

对于微可压缩流体,求解 $C_L = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}$,得

$$\rho = \rho_0 \exp[C_L(p - p_0)] \quad (1-4-3)$$

忽略高阶小量,则有

$$\rho = \rho_0 [1 + C_1(p - p_0)] \quad (1-4-4)$$

对于气体来讲,真实气体压缩性可以通过真实气体状态方程来描述,真实气体状态方程为

$$pV = ZnRT \quad (1-4-5)$$

式中 Z ——气体压缩系数;

V ——气体体积;

n ——物质的量;

R ——真实气体常数。

气体压缩系数定义为

$$C_g = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \right)_T \quad (1-4-6)$$

如果 $Z=1$ (理想气体),式(1-4-6)则是著名的玻意耳—马略特(Boyle—Mariotte)定律,这时有简洁关系式

$$C_g = \frac{1}{p} \quad (1-4-7)$$

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。在采油过程中,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,造成孔隙体积减小,孔隙度和渗透率降低。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。

以上分析说明,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

$$C_f = \frac{1}{V_p} \frac{\partial V_p}{\partial p} \quad (1-4-8)$$

如果渗流过程是等温过程,只需要将公式(1-4-8)中的偏导改为导数就可以了,即

$$C_f = \frac{1}{V_p} \frac{dV_p}{dp} = \frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dp} \quad (1-4-9)$$

求解得 $\phi = \phi_0 \exp[C_f(p - p_0)]$, 忽略高阶小量,则有

$$\phi = \phi_0 [1 + C_f(p - p_0)] \quad (1-4-10)$$

第五节 渗流的基本定律——达西定律

一、线性渗流定理

1856年,法国水力工程师 H. 达西(Darcy)为解决第戎市供水,通过砂的渗透试验获得了渗流力学最基础的达西实验定律。

达西实验装置如图 1-5-1 所示。实验表明,在一定速度变化范围内,流体通过填砂管横截面的体积流量 Q 与横截面积 A 成正比,与管长 L 成反比,与作用在填砂管两端的水头差 $\Delta H = H_1 - H_2$ 成正比。用公式表示为

$$Q = K'A \frac{H_1 - H_2}{L} = K'A \frac{\Delta H}{L} \quad (1-5-1)$$

式中 K' ——比例系数。

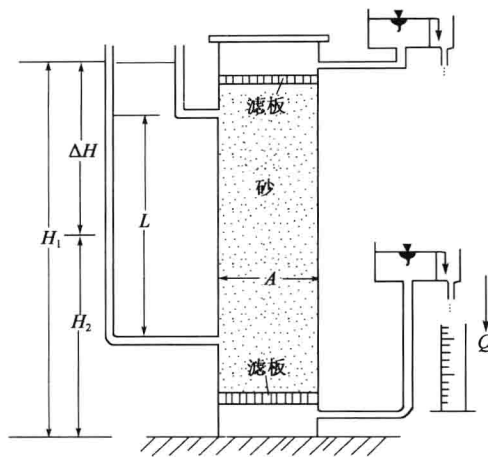


图 1-5-1 达西试验装置示意图

根据水力学伯努利(D. Bernoulli)方程,单位质量液体的位置势能、压强势能和动能三者之和为常数,即

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

式中,三项之和为测压水头。由于渗流速度小,忽略动能项后作差得

$$H_1 - H_2 = L + \frac{p_1 - p_2}{\rho g}, |v| = \frac{Q}{A} = K' \left(1 + \frac{p_1 - p_2}{\rho g L} \right) = K' \frac{\rho g + (p_1 - p_2)/L}{\rho g}$$

实验表明,水力传导系数 K' 与密度成正比,与黏度成反比,比例系数为 K ,则

$$K' = K\rho g / \mu \quad (1-5-2)$$

式中 K ——渗透率。

这样就有

$$v = -\frac{K}{\mu} \left(\frac{p_1 - p_2}{L} + \rho g \right) \quad (1-5-3)$$

式(1-5-3)中,负号是考虑到速度方向与压力增长方向相反而加入的。对于倾斜介质,有

$$v = -\frac{K}{\mu} \left(\frac{p_1 - p_2}{L} + \rho g \sin\theta \right) \quad (1-5-4)$$

式中 θ ——介质与水平方向夹角。

与地下多孔介质渗流的复杂性相比,达西定律显得过于简单,但它是一个实用、方便的公式,并非对地下流体渗流客观现象的真实描述。达西定律表达形式如下。

流量表达式为

$$Q = -\frac{KA}{\mu} \left(\frac{p_1 - p_2}{L} + \rho g \sin\theta \right) \quad (1-5-5)$$

微分表达式为

$$v = -\frac{K}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial L} + \rho g \sin\theta \right) \quad (1-5-6)$$

矢量表达式为

$$\mathbf{v} = -\frac{K}{\mu}(\nabla p + \rho \mathbf{g}) \quad (1-5-7)$$

渗流速度是流体通过单位渗流截面的体积流量,方向是从高势端指向低势端,公式为

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1-5-8)$$

根据连续介质观点,渗流速度是时间、空间坐标的连续函数,是矢量。

真实速度定义为流体通过单位连通孔隙截面的体积流量,即

$$v_t = \frac{Q}{A\phi} = \frac{v}{\phi} \quad (1-5-9)$$

真实速度是流体通过单位渗流截面的体积流量。

采用 CGS 制单位和 SI 单位,有

$$\begin{aligned} v &= -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial L}, [\text{cm/s}] \sim \frac{[\text{D}] \cdot [\text{atm}]}{[\text{cP}] \cdot [\text{cm}]}, [\text{m/s}] \sim \frac{[10^3 \mu\text{m}^2] \cdot [\text{MPa}]}{[\text{mPa} \cdot \text{s}] \cdot [\text{m}]} \\ K &= \frac{Q\mu L}{A\Delta p}, [\text{D}] \sim \frac{[\text{cm}^3/\text{s}] \cdot [\text{cP}] \cdot [\text{cm}]}{[\text{cm}^2] \cdot [\text{atm}]} \\ K &= \frac{1}{86.4} \frac{Q\mu L}{A\Delta p}, [\mu\text{m}^2] \sim \frac{1}{86.4} \times \frac{[\text{m}^3/\text{d}] \cdot [\text{mPa} \cdot \text{s}] \cdot [\text{m}]}{[\text{m}^2] \cdot [\text{MPa}]} \end{aligned}$$

达西定律可与傅里叶传热定律、电流定律、菲克扩散定律类比。

$$Q_t = -KA \frac{dT}{dL}, Q_e = \frac{A}{\rho} \frac{dE}{dL}, Q_c = -DA \frac{dC}{dL} \quad (1-5-10)$$

根据相似性,在理论上,可以通过对电流或热流的研究,研究许多关于多孔介质中流体流动的情况;在实验方面,可以相当简单地制造一些传热流或导电流模型,通过对电流或热流场等的研究,获取人们对流体在多孔介质中的流动特征认识。

二、渗透率张量

1. 渗透率定义

由达西定律,可以得到渗透率的定义。

渗透率 K 是达西定律中的比例系数,其大小反映储层的另一特性是流体在孔隙中流动的能力,也就是储层的渗透性。它是指在一定的压力差下,岩石允许流体通过其连通孔隙的性质。储层渗透性决定了油气在其中渗滤的难易程度,它是评价储层产能的主要参数。

$$K = -\frac{\mu v}{\frac{\partial p}{\partial L} + \rho g \sin \theta} \quad (1-5-11)$$

2. 渗透率张量

一般来说,储层岩石是各向异性的,即渗透率与方向有关。岩石的渗透率是一个二阶对称张量 ($K_{xy} = K_{yx}, K_{yz} = K_{zy}, K_{zx} = K_{xz}$), 此时达西定律为

$$\mathbf{v} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu}(\nabla p + \rho \mathbf{g}), \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

忽略重力,其分量形式为