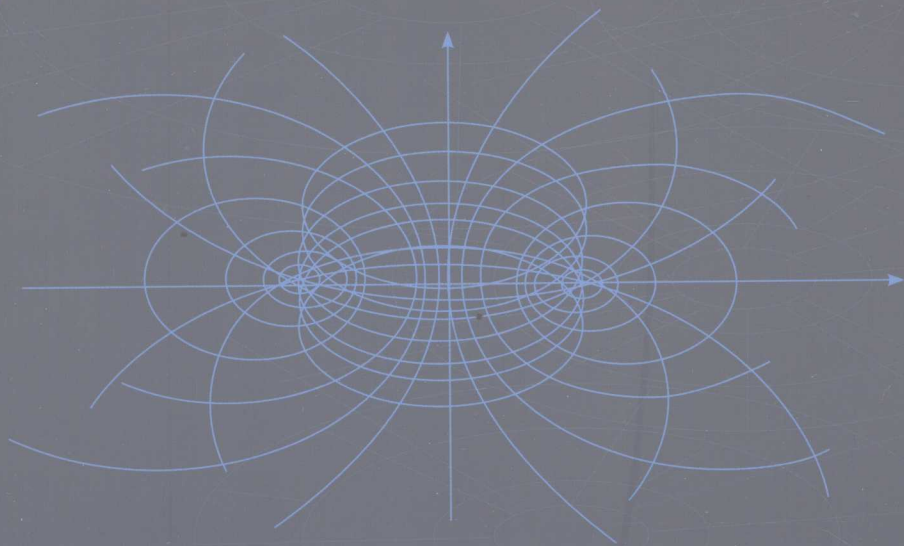




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



油气层渗流力学

(第二版)

■ 张建国 杜殿发 侯 健 雷光伦 吕爱民 主编

中国石油大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

油气层渗流力学

(第二版)

张建国 杜殿发 侯 健 雷光伦 吕爱民 主编

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

油气层渗流力学/张建国等主编. —2 版. —东营:中国
石油大学出版社, 2009. 3
ISBN 978-7-5636-2830-8

I. 油… II. 张… III. 油气藏渗流力学 IV. TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 026446 号

书 名: 油气层渗流力学(第二版)

作 者: 张建国 杜殿发 侯 健 雷光伦 吕爱民

责任编辑: 高颖(电话 0532—86981531)

封面设计: 九天设计

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 沂南县汇丰印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392563)

开 本: 180×235 印张: 19.75 字数: 408 千字

版 次: 2009 年 4 月第 2 版第 1 次印刷

定 价: 29.00 元

前 言

本书是按石油工程专业本科四年制教学大纲,在 1998 年张建国等主编的《油气层渗流力学》的基础上,参考各兄弟院校的同类教材并加以补充完善,重新组织编写而成的。《油气层渗流力学》一书不但在石油工程专业应用,其他专业也将其作为选修课教材,而且成人教育、函授教育、网络教育亦将其作为渗流力学教材使用。本书编写时,在力求保持原教材基本概念明确和基本研究方法清晰、重视理论与实践探索结合等特色的基础上,对各章节内容作了适当调整,同时为了更好地适应成人教育及自学者的需要,在每章后增加了要点提示和大量思考题,并将总习题分解到各章中以便自学之用。

本书以石油工程专业本科生为主要对象,系统地介绍了油气层渗流力学的基础理论和基本研究方法,同时也简单介绍了复杂条件下的渗流问题的研究进展,所以也可以作为从事油藏工程方面工作的技术人员的参考书。而有志于对渗流力学学科其他分支及其他专门问题进行深入研究和探讨的研究者,可参阅有关的专门著作。

本书由张建国主编,其他多位有着多年渗流力学教学经验的中青年教师也参与了编写,因此可以说本书是集体智慧的结晶。全书共分九章,其中第一章和第二章由雷光伦编写,第三章由杜殿发编写,第四章、第六章、第九章由张建国编写,第五章和第七章由侯健编写,第八章由吕爱民编写。全书由张建国负责统一修改和定稿。

本书的出版受到中国石油大学(华东)的资助,得到学校教务处及石油工程学院同事们的关心和支持,在此表示感谢。书中参考和引用了大量文献,在此谨向相关学者深表谢意。

由于编者水平有限,书中如有不当之处,敬请广大同仁和读者指正。

作 者

2008 年 12 月

目 录

绪 论	1
第一章 渗流的基本概念和基本规律	3
第一节 油气藏及其简化	3
第二节 多孔介质及连续介质场	6
第三节 渗流过程中的力学分析及驱动类型	15
第四节 渗流的基本规律和渗流方式	22
第五节 非线性渗流规律	27
第六节 在低速下的渗流规律	29
第七节 两相渗流规律	31
第二章 油气渗流的数学模型	37
第一节 建立油气渗流数学模型的原则	37
第二节 运动方程	41
第三节 状态方程	41
第四节 质量守恒方程	44
第五节 典型油气渗流微分方程的推导	49
第六节 数学模型的边界条件和初始条件	53
第三章 单相液体稳定渗流理论	58
第一节 单相液体稳定渗流基本方程的解及其应用	59
第二节 井的不完善性对渗流的影响	73
第三节 油井的稳定试井	75
第四节 势的叠加和多井干扰理论	77
第五节 势的叠加原理的典型应用	86
第六节 考虑边界效应的镜像反映法	93
第七节 复势理论在平面渗流问题中的应用	100
第八节 平面渗流场的保角变换方法	117
第九节 等值渗流阻力法	126

第四章 弹性微可压缩液体的不稳定渗流	139
第一节 弹性不稳定渗流的物理过程	139
第二节 弹性不稳定渗流无限大地层典型解	143
第三节 弹性不稳定渗流有界地层典型解	149
第四节 弹性不稳定渗流的叠加和映射	151
第五节 圆形封闭地层中心一口井拟稳态时的近似解	154
第六节 带时间变量边界条件的不稳定渗流——杜哈美原理	157
第七节 油井的不稳定试井	162
第五章 气体渗流理论	178
第一节 气体渗流的数学模型	178
第二节 气体的稳定渗流	181
第三节 气井的稳定试井	190
第四节 气体不稳定渗流微分方程的典型解	193
第五节 气井的不稳定试井	195
第六章 油水两相渗流理论	204
第一节 油水两相渗流的基本微分方程	204
第二节 活塞式水驱油	209
第三节 非活塞式水驱油	211
第七章 油气两相渗流理论	229
第一节 油气两相渗流的物理过程	229
第二节 油气两相渗流的数学模型	231
第三节 油气两相稳定渗流	234
第四节 油气两相不稳定渗流	238
第八章 双重介质渗流	246
第一节 双重介质单相渗流数学模型的建立	247
第二节 双重介质简化渗流模型无限大地层典型解及应用	250
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	255
第四节 双重介质中的油水两相渗流	258
第九章 复杂渗流理论简介	265
第一节 孔隙介质中的物理化学渗流	265
第二节 非牛顿流体的渗流	278
第三节 非等温渗流	289
第四节 各种复杂介质中的渗流	295
附表 幂积分函数表	308
参考文献	310

绪 论

由固体骨架和相互连通的孔隙、裂缝、溶洞或各种类型的毛细管体系所组成的材料叫做多孔介质。流体通过多孔介质的流动称为渗流或渗滤。渗流力学就是专门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,同时也是流体力学与多孔介质理论、表面物理、物理化学、固体力学、生物学、生理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、机械等工程领域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为生物渗流;而石油、天然气、地下水等流体在地下储集层的渗流则称为地下渗流。

由于多孔介质具有孔道内径小、毛管作用普遍、比表面积大、表面分子作用显著、表面现象突出且复杂等特点,所以流体在其中流动时阻力大。此外,由于孔道形状和连通形式极为复杂,无论是其微观表象还是宏观的非均质性一般都十分严重,同时流动过程还往往伴随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分支明显地区别开来,而成为一门独立的分支学科。渗流力学是一门基础学科,有着广泛的应用性。

渗流力学涉及的范围非常广泛。工程渗流是冶金、化工、机械、水工及建筑工程等部门利用多孔技术的基础,例如冶金工业中利用氩气通过多孔耐火砖进行钢液脱气,化学工业中的催化塔、填充床的渗流运动也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毛细血管的血液流动、植物体内矿物质和水分的输送等都属于渗流范畴。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、地热等都存在于多孔介质(地层)中,因此,开发地下流体矿床必须掌握渗流规律。由此可见,在国民经济的众多工程领域和部门都涉及渗流现象及渗流理论的应用问题,诸如油气田开发、地下水及地热资源利用、水利工程、农田灌溉、土壤改良、生物工程、化工生产、机械冶金、环境保护、地震研究以及防止城市地面沉降等都与渗流力学有着密切的联系。

油气层渗流力学只涉及地下流体在油气层中的渗流形态和渗流规律的研究,属于地下渗流力学的一部分。地下渗流力学起源于19世纪50年代,由于当时给水和排水工程的需要,由法国水利工程师Darcy在实验基础上建立了经典渗流力学的基本定律——达西定律。这标志着渗流力学学科的诞生。但渗流力学真正成为一门独立的学科分支是在20世纪30年代。这与地下水的开发利用及石油与天然气工业的飞速发展

是分不开的。正是由于石油工业的迅速发展,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。

“油气层渗流力学”是石油工程专业的重要专业基础课之一,同时也是其他相关专业的选修课。作为油田开发工作者,学习油气层渗流力学的目的就是要把它当做认识油层、改造油层的工具,当做油气田开发设计、动态分析、油气井开采、增产工艺、反求地层参数和提高采收率等的理论基础。

近代科学技术的迅速发展,推动着渗流理论的研究向更新的深度和广度发展。从深度上看,渗流理论将逐渐向着宏观研究与微观研究相结合的方向发展。从广度上看,近二十几年来,工程渗流和生物渗流理论研究有了较快发展。此外,物理化学渗流、非达西渗流、低渗介质中的渗流、微渗流、流固耦合渗流、渗流中的现代非线性科学及核磁共振技术、CT 扫描技术在渗流研究中的应用研究也都取得了重要进展。渗流理论的内涵不断深化,应用范围不断拓广,技术手段日益先进,现代化物理模拟技术、测试技术、自动控制技术以及数据处理技术等为复杂渗流机理的实验研究提供了较好的条件。在理论渗流力学迅速发展的同时,现代计算技术和现代实验技术的飞速发展也促进了计算渗流力学和实验渗流力学的重大进展。这些进展无疑给油气田的高效开发提供了更为坚实的理论依据和更为先进的计算方法。

第一章 渗流的基本概念和基本规律

第一节 油气藏及其简化

油气藏(reservoir)是油气储集的场所和流动的空间。油气藏限制流体的运动范围,影响流体的渗流形态,同时还决定流动的边界形状,所以油气藏是渗流的重要外部条件。

一、油气藏的类型

地球成岩作用的复杂性和油气分布的广泛性,使得目前世界上发现的油气藏千差万别、形式多样。按油气渗流特点将复杂多样的油气藏进行归类,对研究油气的渗流特点和规律有重要意义。按圈闭形成条件的不同,油气藏可划分为构造油气藏、地层油气藏和岩性油气藏三个基本类型。

1. 构造油气藏

构造油气藏是由地壳运动形成的油气藏。构造油气藏是已发现的油气藏中最重要的一类,它又可以分为以下几个子类:

(1) 背斜油气藏。背斜油气藏是由于地层发生弯曲,向四周倾覆而形成的圈闭中的油气聚集。背斜油气藏在世界已发现的油气藏中占有相当的比例,约占总量的18.8%。图 1-1a 为背斜油气藏示意图。

(2) 断层油气藏。断层油气藏是储集层在构造运动或其他应力作用下发生断裂并运动,被另一侧的不渗透层或断层泥等遮挡,形成圈闭而得到的油气藏。其中,断层不仅可以是油气聚集的遮挡,也可以是油气运移的通道。断层油气藏如图 1-1b 所示。

(3) 刺穿接触油气藏。盐岩、泥岩等可塑性地层,在上覆岩层压力不等时,向压力低的上方拱起并穿入上覆地层,在这些侵入岩体的周围形成的油气藏为刺穿接触油气藏。

2. 地层油气藏

地层油气藏主要是在地层沉积作用时形成的油气藏,即主要依靠不同时期地层沉积的组合关系和岩性变化而形成的。地层油气藏是一类与地层不整合密切相关的油气藏,主要包括:

(1) 潜山油气藏。潜山是指较老的地层在被侵蚀后,被新沉积物掩埋在地下的侵

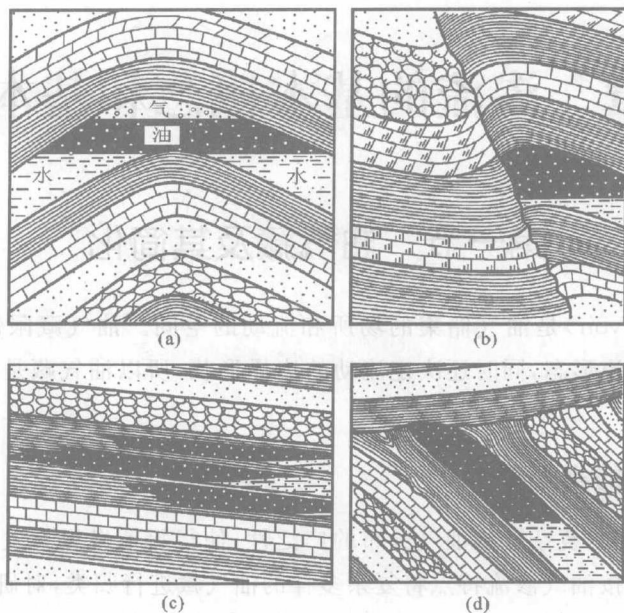


图 1-1 油气藏类型示意图

蚀残丘,或是构造成因,或是二者的组合。其中包括选择性侵蚀作用形成的残丘、断裂作用形成的断块山、褶皱和侵蚀作用形成的背斜以及褶皱与断裂双重作用产生的半背斜等。

这些潜山受地下水或地表水的作用,或受剥蚀作用,使得古地形突起的岩石产生众多的孔洞和裂缝,在以后的地壳运动中,又被不渗透岩层不整合覆盖。

这类油藏的特点是:油藏有底水,油气、油水界面往往与地面斜交。任丘油田就属于这类油藏。

(2) 生物礁油气藏。生物礁的形成与潜山类似,不同的是生物礁是由沉积作用产生的,而潜山则是溶蚀作用的结果。

这类油藏的特点是:含油气丰富,常形成大油气藏。

(3) 不整合覆盖油气藏。不整合覆盖油气藏存在于储集层上倾部分被剥蚀,然后又被不渗透岩层不整合遮挡形成的圈闭中,如图 1-1d 所示。

这类油藏的特点是:闭合面积大,含油气丰富。

(4) 地层超覆油气藏。地层超覆圈闭一般位于盆地边缘不整合面之上,其上为不渗透岩层向前推进的遮挡,其下被不整合面下的不渗透层所封闭。

这类油气藏的特点是:油藏一般不大。

3. 岩性油气藏

储集层的岩性或物性发生侧向变化,形成圈闭而产生的油气藏为岩性油气藏。

(1) 透镜状岩性油气藏。透镜状岩性油气藏形成于透镜状和各种不规则形状的储集层中,四周皆为不渗透或渗透性不好的岩层所围限,如图 1-1c 所示。

这类油气藏的特点是:规模一般不大,与其周围的界限有些是清晰的,有些是变化的,油气在其中可以充满整个储集层,也可以占据其上部,下有底水。如延长油田就属于此类油藏。

(2) 尖灭性岩性油气藏。尖灭性岩性油气藏储集层沿上倾尖灭或渗透性变差而形成圈闭。这类油气藏比透镜状岩性油气藏分布更为广泛。

这类油气藏的特点是:油气聚集的上倾边缘一般为储集层的尖灭线或相变线,下倾方向为底水所限。如玉门的老君庙油田就属于此类油藏。

二、油气藏的简化

从以上油气藏的分类可以看出,油气藏的类型复杂、形式多样,但根据流体在其中流动的空间特点,可以将其分为两大类,即层状油藏和块状油藏。

1. 层状油藏

层状油藏往往存在于海相沉积和内陆盆地沉积当中,油层平缓、分布面积大,一般具有多油层、多旋回的特点。

从纵向上看,由于受到沉积韵律的支配,一个大的沉积旋回常可分为一个或几个油层组。每一个油层组可划分为几个油层。油层内又可划分为若干小层。这些小层之间常有泥岩、泥质砂岩等作为盖层、夹层和底层。在一般压力下,储集层中的流体难以穿越盖层、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,位于构造下部。

从横向水平延伸情况来看,这类层状构造的边界存在着两种情况,即封闭边界和定压边界。如果岩层为孤立体,周界为断层或岩性边界所圈闭,并且没有边水供给,就叫做封闭边界,如图 1-2 所示;如果岩层较稳定,一直延伸到地表,并且有边水供给区,在边界上又保持恒定的压头,就叫做定压边界,如图 1-3 所示。

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。

2. 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,后来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



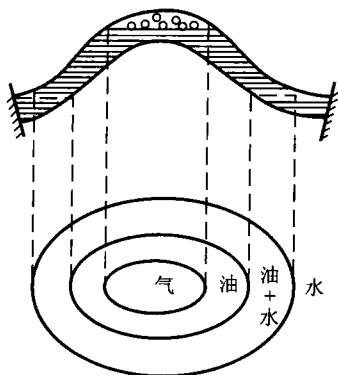


图 1-2 封闭边界油藏

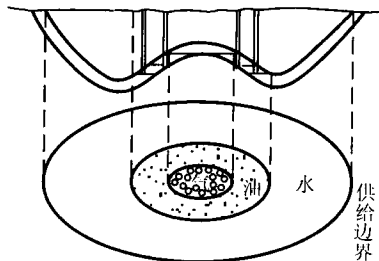


图 1-3 定压边界油藏

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细管力和重力的作用。在这类油藏中,油、气、水的分布在纵向上可以分为三个区: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 多孔介质及连续介质场

油气藏除具有圈闭条件和遮挡条件外,油层本身是由岩石骨架构成的,即由大量的毛细管或微毛细管结构组成的固体介质,也叫多孔介质(porous media)。多孔介质是渗流赖以存在的条件。多孔介质具有孔隙性、渗透性、比表面积大及孔隙结构复杂等基本特点。

一、多孔介质的储容性

多孔介质以固相介质为骨架,其中包含一部分空的孔隙空间,被均质或多相流体所占据,但其中至少有一相为流体。孔隙具有储集和容纳流体的性质,这是多孔介质的重要特性。多孔介质储集流体的多少与孔隙空间的大小有关。孔隙空间的大小用孔隙度(porosity)表示。岩石总孔隙体积与岩石视体积之比,为绝对孔隙度,用下式表示:

$$\phi_a = \frac{V_r}{V_t} \quad (1-2-1)$$

式中 V_r ——岩石总孔隙体积, cm^3 ;

V_t ——岩石视体积, cm^3 ;

ϕ_a ——绝对孔隙度。

在估算油藏绝对储量时,绝对孔隙度的大小具有重要意义。

实际上,岩石孔隙中有一部分是流体通不过的死孔隙,这部分孔隙对渗流来讲是无效孔隙。表征流体可以通过的有效孔隙空间的大小用有效孔隙度,即岩石有效孔隙体积与岩石视体积之比表示,公式为:

$$\phi = \frac{V_e}{V_t} \quad (1-2-2)$$

式中 V_e ——岩石有效孔隙体积, cm^3 ;
 ϕ ——有效孔隙度。

二、多孔介质的渗透性

多孔介质的孔隙空间具有连通性,流体可以在这部分连通的孔隙空间中流动。多孔介质允许流体通过的能力叫渗透性(permeability)。渗透性的大小用渗透率 k 表示:

$$k = \frac{Q\mu\Delta L}{A\Delta p} \quad (1-2-3)$$

式中 k ——岩样渗透率, $\mu\text{m}^2(\text{D})$;
 Q ——通过岩石的流量, cm^3/s ;
 μ ——流体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;
 ΔL ——两渗流截面的距离, cm ;
 A ——岩石截面积, cm^2 ;
 Δp ——岩样两端的压差, 10^5Pa 。

渗透率单位的物理意义是:粘度为 $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的流体,在压力降为 $1\times 10^5\text{Pa}$ 的条件下,通过截面积为 1cm^2 、长度为 1cm 的岩样,当流量为 $1\text{cm}^3/\text{s}$ 时,岩样渗透率为 $1\mu\text{m}^2$ 。

岩石渗透率的大小只与岩石的性质有关,它取决于岩石的孔隙结构和孔隙大小,与通过的流体的性质无关。

当存在多相流体时,有不同的渗透率表示方法。

1. 绝对渗透率

当岩石孔隙中的流体为一相时,岩石允许流体通过的能力叫做绝对渗透率。绝对渗透率是与岩石本身性质有关的一种属性。

2. 有效渗透率

当岩石中有两种以上流体存在时,岩石对其中一相的通过能力叫做该相的有效渗透率。如果各相同时流动,通常又称为相渗透率。有效渗透率除与岩石性质有关外,还与其他相的性质和在岩石中的饱和状况有关。岩石孔隙中其他流体的存在,均会使该相流体的渗透能力降低,从而使有效渗透率小于绝对渗透率。

3. 相对渗透率

岩石的有效渗透率与绝对渗透率的比值叫做相对渗透率。各相的相对渗透率小于

1。

三、多孔介质的比面

多孔介质由固体骨架和大量任意分布的孔隙组成,如图 1-4 所示,因此固相介质有很大的表面积。

单位体积岩石所有岩石颗粒的总表面积或孔隙内表面积,叫做岩石的比表面积(specific area),简称比面。

多孔介质的一个基本特征是固体颗粒的比面很大,如 1 m^3 中等粒度砂岩的表面积在 $2\,000 \text{ m}^2$ 以上,因此孔隙中的流体与固体颗粒的接触面积就非常大,流体要克服与表面的摩擦力而运动就需要消耗很大的能量。



图 1-4 岩石孔隙铸体

四、多孔介质孔隙结构分类

多孔介质孔隙结构复杂,具有不同的孔隙类型(如粒间孔隙、裂缝、溶洞等)和不同的孔隙成因。由于组成孔隙介质的岩石颗粒在体积大小、形状及表面粗糙程度上多种多样,使得多孔介质在形状和连接形式上极为复杂。而且大部分孔道都有一个很狭小的喉道,这就更增加了流动阻力。

多孔介质巨大的比面和复杂的孔隙结构,使得渗流具有阻力大、流动速度慢的特点。

从渗流力学的角度,油气层孔隙介质可以分为:单纯介质、双重介质和三重介质三种。单纯介质有粒间孔隙结构和纯裂缝结构;双重介质有裂缝-孔隙结构和溶洞-孔隙结构;三重介质只有一种结构——三重混合结构(溶洞-裂缝-孔隙结构,即大洞或大裂缝和微裂缝、微孔隙共生)。

1. 粒间孔隙结构

粒间孔隙结构是碎屑岩的基本孔隙结构形式,由大小和形状不同的颗粒所组成,颗粒之间的间隙被充填物充填。由于胶结不完全,在颗粒之间形成了粒间孔隙。这些粒间孔隙既是储油空间,又是油流通道。

粒间孔隙结构又分为非层理结构和微层理结构。

微层理结构受沉积条件控制,颗粒沉积的大小界线分明,产生了带有方向性的斜层理、弧形斜层理和交错层理。微层理决定着油气流动的方向,但需要把油气层看成是各向异性的渗流介质场。

除微层理之外的粒间孔隙结构均为非层理结构。由于这种结构是由颗粒堆积而成的,因此它的孔隙结构是四面八方相连通的,油气流动没有明显的方向性。

对于单一粒间孔隙的碎屑岩,可以把实际地层转化为“假想结构模型”来研究,即将实际地层的孔隙结构用一种假想化的孔隙结构来模拟。早期的方法认为岩石是由直径

相同的圆球颗粒组成的,流体在粒间孔隙中流动,如图 1-5 所示。

另一种发展的地层结构模型是“理想结构模型”。该模型将岩石的孔隙空间看成是由一束等直径(或按一定方向分布的变直径)的微毛管组成的。开始时认为毛管是由直径不变的直毛管组成的,如图 1-6a 所示。

采用等直径毛管束模型的目的是将管道水力学的流动规律引入渗流力学中,把管道水力学计算流量的公式与渗流力学的流量计算等值起来,从而寻找渗透率与毛管参数间的关系。

但利用毛管模型求等值渗流阻力时,发现与实际有很大的误差,其原因是实际毛管不是直的和等直径的,因此引入了变截面弯曲毛管模型,即修正理想结构模型,如图 1-6b 所示。

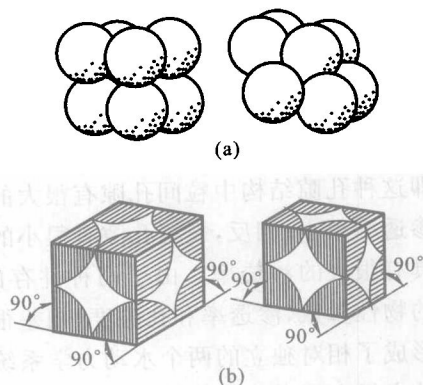


图 1-5 假想结构模型

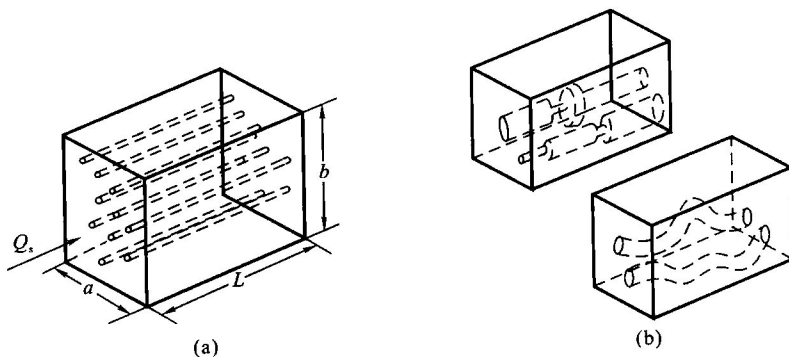


图 1-6 理想结构模型

(a) 理想结构模型; (b) 修正理想结构模型

理想结构模型一般用于研究基本渗流规律。对于微层理结构,孔隙结构模型上把它看成与非层理结构模型一样,但计算时应把渗透率看成张量。

2. 纯裂缝结构

对致密的碳酸盐岩,油气基本是不渗透的,但在这种岩石中,如果产生微裂缝,就叫做纯裂缝结构,则裂缝就是储油空间和油流通道,是一种单纯介质。

纯裂缝的地质模型是由垂直方格裂缝网格组成的,裂缝将地层分隔成许多立方体,如图 1-7 所示。

3. 裂缝-孔隙结构

近年来在塔里木盆地发现了大量带有裂缝和溶洞的双重孔隙介质。这种双重孔隙介质,特别是在石灰岩、白云岩油气层中普遍存在。这种岩石具有两种孔隙结构:裂缝-

孔隙结构和溶洞-孔隙结构。

在裂缝-孔隙结构中,粒间孔隙被分隔成一个个团块,由粒间孔隙组成的团块是主要的储油空间,而渗透率很大的裂缝是主要的油流通道,即这种孔隙结构中粒间孔隙有很大的孔隙度,但渗透率很小;相反,裂缝孔隙有很小的孔隙度,却具有很大的渗透率。由于两种并存的孔隙体系的物性参数(渗透率和孔隙度)相差很悬殊,所以形成了相对独立的两个水动力学系统,这两个水动力场之间存在流体交换。

裂缝-孔隙结构的基本特点是:双重孔隙度、双重渗透率、两个平行的水动力场以及两种孔隙间流体窜流。

实际的裂缝-孔隙双重结构中,裂缝的分布是杂乱无章的,可把它典型化为垂直交叉的裂缝网,将地层分割成长方形的粒间孔隙团块,如图 1-8b 所示,并认为裂缝渗透率 k_1 大于团块渗透率 k_2 ,而裂缝孔隙度 ϕ_1 小于团块孔隙度 ϕ_2 。

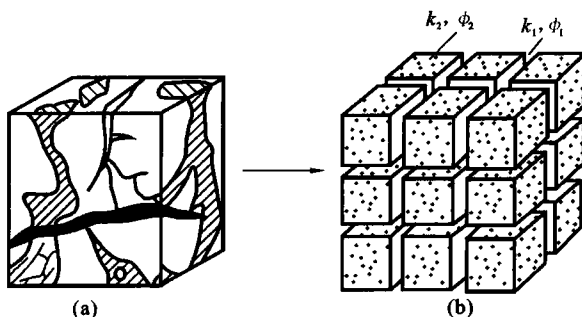


图 1-8 双重介质结构图

(a) 实际裂缝地层; (b) 裂缝-孔隙结构模型

4. 溶洞-孔隙结构

溶洞-孔隙结构(洞隙结构)是指在粒间孔隙地层中分布着大洞穴,洞穴的尺度超过毛管大小。因此,在这种孔隙结构中,两种不同的孔隙服从两种不同范畴的流动规律。粒间孔隙只有毛管尺度大小,流体在其中的流动服从渗流规律;而洞穴已超过毛管大小,服从纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)流体力学规律。所以洞隙结构也是一种双重介质。我们把粒间孔隙地层中杂乱无章地分布的洞穴(见图 1-9a)模型化为形状是球形且大小也相同的洞穴,并且均匀整齐地排列在地层当中(见图 1-9b)。

5. 溶洞-裂缝-孔隙结构

溶洞-裂缝-孔隙结构是裂隙结构再加上大洞穴或大裂缝,形成粒间孔隙、微裂缝、

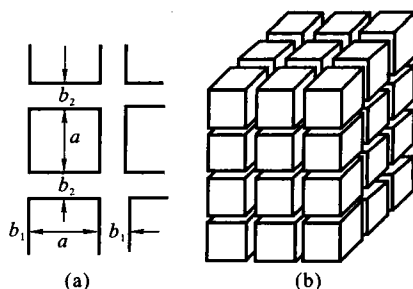


图 1-7 纯裂缝结构图

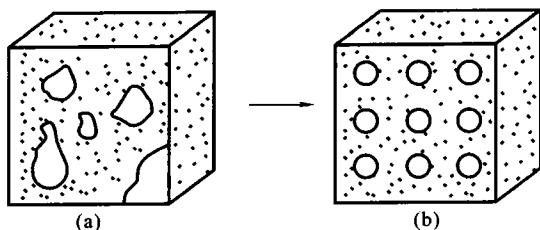


图 1-9 洞穴-孔隙结构图

(a) 实际洞缝结构地层; (b) 洞穴-孔隙结构模型

大洞穴或大裂缝并存的混合结构。在碳酸盐油气层中,钻井常遇到放空数米或数十米的现象就是这种结构存在的证据。目前,这种结构的渗流规律还处于探索研究阶段。

五、连续流体

流体是由大量的分子所组成的集合体,一方面分子之间相互碰撞,另一方面它们又和所处的容器壁发生碰撞,即分子处于不停的运动中。按古典力学理论,可以充分地描述一个给定的分子系统,若给出它们在空间的原始位置和它们的力矩,就可以推算出它们以后的位置,但实际计算是难以实现的。例如,1 mol 的天然气中有 6.02×10^{23} 个分子在运动,若以个别分子为对象来研究,则方程数目巨大,即使用计算机计算也会有很大困难,同时也无法用一般的观察手段来测定每个分子的原始位置和它们的力矩。

由此不难看出,需要引进另外一种方法来研究流体的性质和它的运动。这种方法不以个别分子为对象,而是以由很多分子组成的“系统”为研究对象,对流体的每一个分析结果和实验结果都以统计学的形式表现出来。用这种方法确定的是连续测定的平均值,而不是确切推算出每一个分子的结果。这种方法就是统计力学方法。

统计力学是一种分析科学。用这种方法得到的是很大数目分子运动的统计性质。通过这种对大量分子统计性质的研究,反过来控制个别分子运动的规律。当放弃了用分子作为对象的处理方法之后,就可以忽略实际流体的结构而将其看成连续流体的现象来描述。

把流体处理成连续的介质,从本质上来说,就是把流体中的质点看成在一个很小体积中包含着很多分子的结合体。质点既要比单个分子的自由路程大得多,又要充分的小,要比所研究的流体区域小得多。质点内的流体和流动性质是分子平均起来的统计值,这些数值和某些质点的质量中心有关。在流体占据的整个区域内的任意点上,都有一个具有一定动力学性质和能量性质的质点。

当涉及质点大小和单元体积的问题时,必须把它考虑成一个物理点或物质点,在点内流体是连续的,并且这个点要用流体的相对密度来定义。

密度是一部分物质的质量 Δm 和它所占有的体积 ΔV 的比值。假如要研究一个数学点,并希望由它给出一个密度值 ρ ,则这个值代表的是某一个流体体积的性质,而这