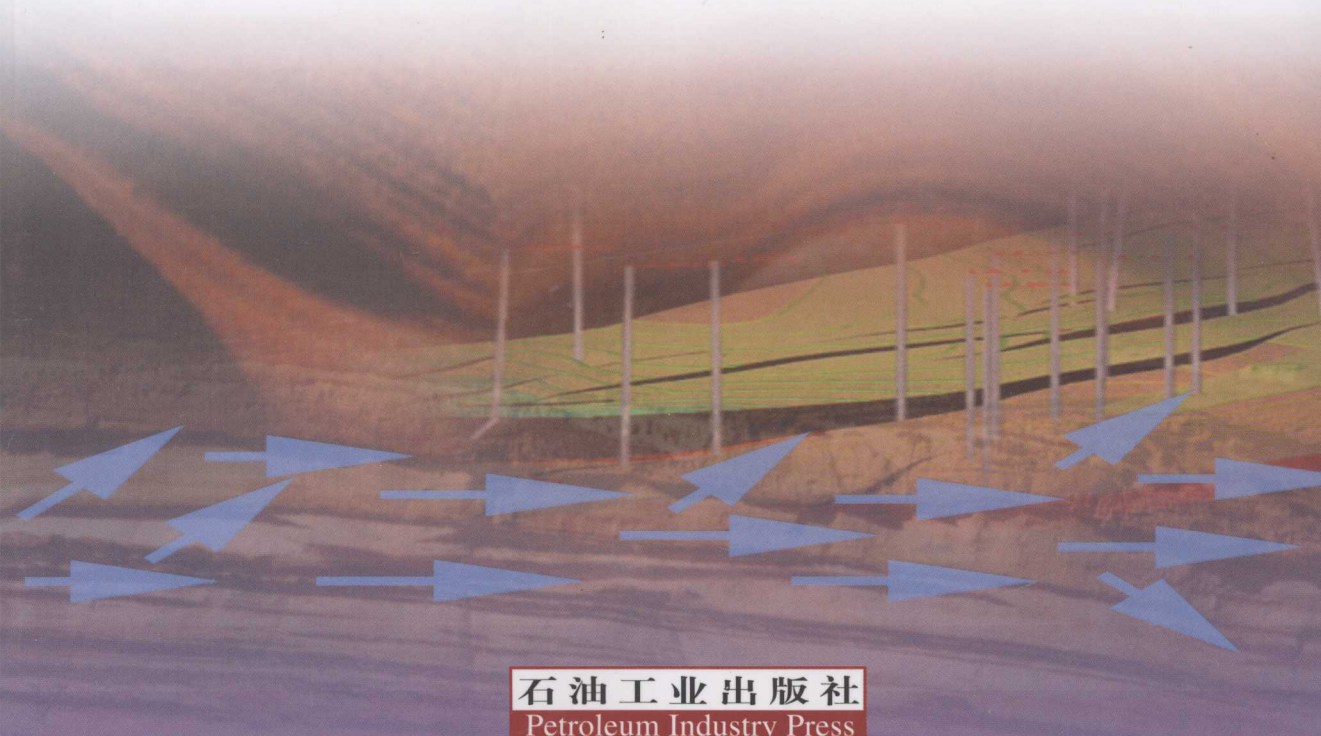




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

地下油气渗流力学

李晓平 主编



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

地下油气渗流力学

李晓平 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从油气渗流的地质基础出发,在对油气渗流的基本规律——达西定律分析的基础上,阐明了油气渗流力学的研究思路和方法。采用循序渐进的思路,全面系统地介绍了单相液体稳定渗流理论、单相液体不稳定渗流理论、气体渗流理论、油水两相渗流理论、油气两相渗流理论、双重介质渗流理论和复杂渗流理论。

本书主要作为高等学校石油工程专业教材,也可作为研究生教育、高等职业教育、成人教育及相关专业的参考教材,还可供从事油气田勘探与开发的科研和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下油气渗流力学/李晓平主编.

北京:石油工业出版社,2007.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5021-6316-7

I. 地…

II. 李…

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 (2007) 第 167916 号

地下油气渗流力学

李晓平 主编

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

2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12

字数: 300 千字

定价: 18.00 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

渗流现象广泛存在于自然界中。存在于油气层的渗流称为地下油气渗流，存在于各种工程技术（化工、冶金、环境保护中的多孔技术的应用）问题中的渗流称为工程渗流，存在于人和动植物体内的渗流称为生物渗流。研究渗流形态和渗流规律的学科称为渗流力学。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、表面理论、物理化学、固体力学、生物学交叉渗透的一门边缘学科。

油气渗流力学是研究油气藏流体在多孔介质储层中的渗流形态和渗流规律的一门学科，是油气田科学开发的基础。

一百多年前，发现了单相渗流的基本规律——达西定律，随着石油及天然气工业的发展，使得油气渗流的研究变得非常活跃，内容不断丰富和完善，它已经渗透到油气田开发与开采的各个环节。

学习“油气渗流力学”的目的，是要把它作为认识油气藏、改造油气藏的工具，作为油气田开发设计、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。因此，它是石油工程专业的主干专业基础课程之一，是学好石油工程其他专业课的基础。

本教材主要介绍油气渗流研究的基本方法和基本理论，共分十章，由李晓平主编。第一章由胡雪涛编写，第二、三、六、七、八章及第四章第一、二、四节由李晓平编写，第四章第三节由彭彩珍编写，第五章由黄全华编写，第九章由刘启国编写，第十章由王健编写，思考题和习题由彭彩珍提供。全书由李晓平统一校订，插图由胡雪涛清绘。在教材的编写过程中得到西南石油大学陈平教授、张烈辉教授、唐海教授等的大力支持和帮助，在数次修改完善中得到教育部博士点基金课题“低渗透气藏非线性渗流理论及气藏方程方法研究”的资助，同时参考了国内外专家的相关教材和专著，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者经验不足，水平有限，教材中存在的不足，敬请读者提出宝贵意见。

编 者

2007年7月

目 录

第一章 油气渗流力学基础.....	1
第一节 油气藏类型及其外部形态的简化.....	1
第二节 油气藏内部储集空间结构的简化.....	5
第三节 多孔介质及连续介质场.....	9
第四节 渗流过程中的概念及渗流形态的简化	14
第二章 油气渗流的基本规律	21
第一节 油气渗流的力学基础	21
第二节 油气渗流的达西定律	22
第三节 油气渗流的非达西定律	27
第四节 两相渗流规律	31
第三章 单相液体渗流数学模型	35
第一节 渗流数学模型的建立原则	35
第二节 渗流数学模型的微分方程	38
第三节 渗流数学模型的定解条件	46
第四章 单相液体稳定渗流理论	50
第一节 单相液体稳定渗流理论	50
第二节 井的不完善性对渗流的影响	59
第三节 多井干扰与势的叠加理论	61
第四节 等值渗流阻力法	85
第五章 单相液体不稳定渗流理论	96
第一节 弹性不稳定渗流的物理过程	96
第二节 弹性液体不稳定渗流理论	99
第三节 不稳定渗流的井间干扰.....	104
第六章 气体渗流理论.....	112
第一节 气体渗流微分方程.....	112
第二节 气体稳定渗流理论.....	118
第三节 气体不稳定渗流理论.....	123
第七章 油水两相渗流理论.....	127
第一节 影响水驱油非活塞性的因素.....	127
第二节 油水两相渗流理论.....	128
第三节 油水两相渗流理论的应用.....	134

第八章 油气两相渗流理论	140
第一节 油气两相渗流的物理过程.....	140
第二节 油气两相渗流微分方程.....	141
第三节 油气两相稳定渗流理论.....	144
第四节 油气两相不稳定渗流理论.....	148
第九章 双重介质渗流理论	152
第一节 双重介质油藏模型.....	152
第二节 双重介质油藏渗流微分方程.....	154
第三节 双重介质油藏渗流理论.....	156
第十章 复杂渗流理论	160
第一节 传质扩散流体渗流理论.....	160
第二节 非牛顿流体渗流理论.....	170
附录	176
附录一 常用参数单位.....	176
附录二 单位换算表.....	177
附录三 公式的单位变换方法.....	178
附录四 常用公式或方程的 SI 实用单位制形式	179
参考文献	181

第一章 油气渗流力学基础

油气渗流力学是研究油气藏流体在多孔介质储层中的渗流形态和渗流规律的学科。油气田开发实践表明，油气储层有着极其复杂的内部空间结构和不规则的外部几何形状，油藏流体在其中的分布特征和流动情况复杂多变。因此，要认识油气渗流的普遍规律，建立能适应各种油气储层特征的数学方程，首先应当了解油气藏的形态特征及内部储集空间的结构类型，并懂得如何为渗流力学研究概括和简化油气层的形态及储集空间结构。

第一节 油气藏类型及其外部形态的简化

自然界的油气藏是由地下生油层中形成的油气通过运移汇集在多孔介质储层中而形成的。不同的油气藏在其地质结构、储层特征、流体性质及流体分布等许多方面千差万别，这些差别对油气藏的勘探和开发都有着巨大的影响。

一、油气藏概念和油藏流体的分布

油气藏是单一圈闭内具有独立压力系统和统一油水界面的油气聚集。油气藏是地壳中最基本的油气聚集单位。圈闭中聚集了石油就称为油藏，聚集了天然气就称为气藏，同时聚集了石油和游离天然气的则称为“油气藏”。

在油气藏中，油、气、水的分布具有一定的规律性。由于油、气、水三者密度差异显著，重力分异的结果，使其在油气藏中的分布总是表现为：气在上、油在中、水在下，形成明显的油气、油水接触面，即油气界面与油水界面。油气界面和油水界面在水平面上的投影分别称为油气边界和油水边界，如图 1-1 所示。

如果位于油层下方的水层（底水）或边部的水层（边水）与油藏周边的水体或地面露头有好的连通性，且在油藏开采过程中有良好的水源供给，相当于在油藏供给边缘上保持一个恒定的压头，其供给边缘在水平面上的投影就称为供给边界。这种油藏称为敞开式油藏，又称为“定压边界”，如图 1-2 所示。

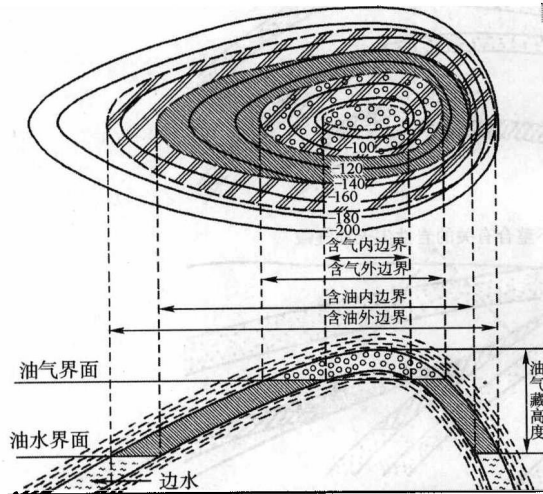


图 1-1 背斜油气藏中流体分布示意图

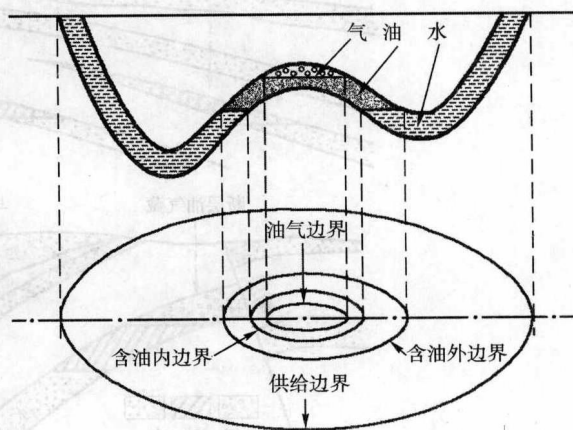


图 1-2 背斜油气藏中流体分布示意图

相反，由于岩性变化或断层阻挡，位于油层下方的水层与油藏周边的水体或地面水不连通，油藏开采过程无水源供给，这种油藏就称为封闭式油藏，油藏边缘在水平面上的投影就称为“封闭边界”，如图 1-3 所示。

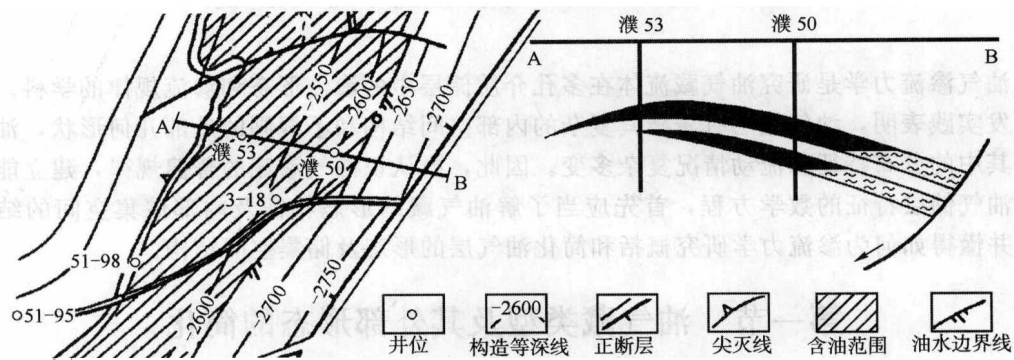


图 1-3 濮城油田砂二上构造岩性油藏示意图
油藏上倾部位岩性尖灭

二、油气藏类型

1. 油气藏分类概述

储层和储层流体（油、气、水）是构成油气藏的最主要的两大要素，对油气藏类型的划分可以从储层或流体两个方面的各种因素为依据，例如根据储层岩石类型分类、储层（油藏）形态分类、储集空间类型分类、流体的类型或流体在储层（油气藏）中的分布等因素划分油气藏类型。因此，对于自然界存在的各种类型的油气藏，不同的研究者从不同的角度，提出了各种不同的油气藏分类方案。

从油气藏勘探角度，国内外石油地质专家曾提出过上百种油气藏分类方案，归纳起来，主要有以下几类：

（1）圈闭成因分类法。以美国 A. I. 莱复生为代表，分为构造油气藏、地层油气藏与复合油气藏三大类型，如图 1-4 所示。

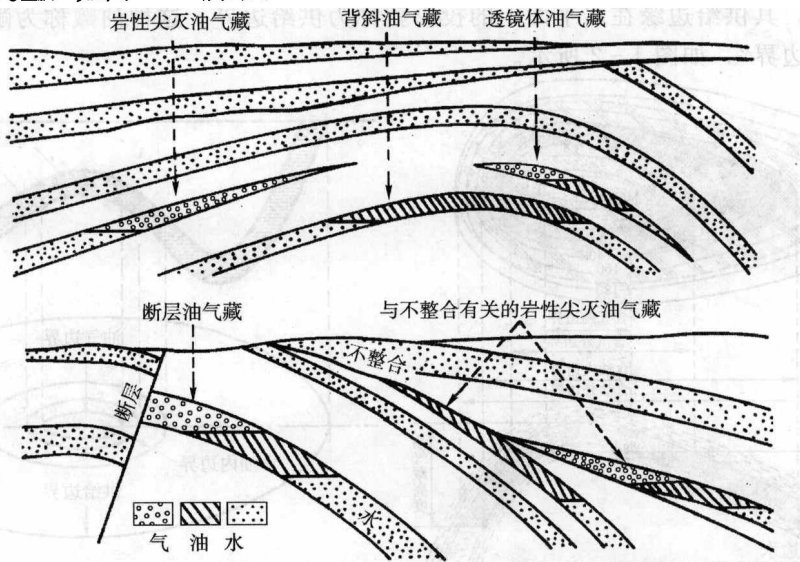


图 1-4 几种类型油气藏示意图

①构造油气藏：指油气聚集在构造圈闭中形成的油气藏，包括背斜油气藏、断层油气藏、裂缝性油气藏和刺穿油气藏。

②地层油气藏：指油气聚集在地层圈闭（储层岩性发生横向变化而形成的圈闭）中形成的油气藏，包括岩性圈闭油气藏、不整合油气藏、生物礁油气藏等。

③复合油气藏：包括构造—地层复合油气藏、地层—流体复合油气藏、构造—流体复合油气藏、构造—地层—流体复合油气藏。

(2) 储层形态分类法。以前苏联 И. О. 布罗德为代表，分为层状油气藏、块状油气藏和透镜体油气藏等，如图 1-4 所示。

(3) 烃类相态分类法。分为油藏、气顶油藏、带油环气藏、气藏和凝析气藏等。

(4) 油气产量和储量分类法。分为工业性油气藏、非工业性油气藏及小、中、大、巨型油气藏等。

从勘探角度的一些分类法有利于找到油气资源，但对开发却难有帮助。因为即使圈闭条件完全一样的油藏，其储层性质、流体性质或驱动能量都可能存在很大的差异，其开发方式和开发效果可能完全不同。

油藏开发地质分类则更为复杂。因为控制和影响油气藏开发过程及开发效果的地质因素有很多，如构造、储层、流体性质、流体分布等。

美国石油学会（API）1967 年将 312 个油藏按天然驱动方式分为 5 类：

- (1) 无辅助驱动的溶解气驱油藏；
- (2) 有辅助驱动的溶解气驱油藏；
- (3) 气顶驱油藏；
- (4) 水驱油气藏；
- (5) 重力驱油藏。

我国建国以来已发现大小油气田 400 余个，其中大多数油气田已经投入开发。油气田开发实践证明，我国油藏类型十分丰富，但油气储层的特点是以陆相储层为主。为此，我国石油工作者依据储层特征将发现的油藏分成了 7 个大类 20 个亚类，其中常见的有 8 个亚类，如表 1-1 所示。

表 1-1 主要亚类油藏开发地质特征比较表（据袁倬楠，《油藏开发分类》）

油藏类型	储层特点						原油性质	边底水	油田实例
	岩性	物性	孔隙结构	几何形态	非均质性	剖面产状			
I ₁	砂岩	高孔中高渗	较好规则	条带规模小	层间、层内严重	层状，砂泥间互，多层	中黏高蜡高凝	边水较弱。油水系统规则	萨尔图胜坳
II ₁	砾质岩	中孔中渗	复杂不规则	小叶状或条带	层间、层内严重	砂砾与泥间互，多层	中黏高蜡高凝		克拉玛依，双河
III ₁	砂岩生物灰岩	低—中孔中—高渗	好	席状	弱	薄层状、层次很少	低黏	边水不活跃	兴隆台沙一中
IV ₁	致密砂岩	低孔低渗	复杂不规则	条带	中等	砂泥岩间互，多层	低黏	边水，油水过渡带宽	马岭
V ₁	碳酸盐岩变质岩	低孔低渗	复杂不规则	以圈闭连片		块状	中黏溶气少	底水活跃	任丘
VI ₁	疏松砂砾岩	中孔中渗	复杂不规则	小叶状或条带	层间、层内严重	砂泥岩间互，多层	重油高胶质沥青质	边水不活跃	克拉玛依六东二区
VI ₃	疏松砂岩	高孔高渗	较好规则	条带	层间、层内严重	砂泥岩间互，多层	高黏低凝	边水较活跃	孤岛
VII ₁	细粉砂岩	中孔中渗	差规则	席状条带	弱	砂泥岩间互，多层	低黏	边水不活跃气顶能量大	板桥

注：孔—孔隙度；渗—渗透率；黏—黏度；凝—凝固点；蜡—含蜡量。

2. 油气藏外部形态简化

目前全世界已经开发的油气藏大约有几万个，其几何形状各式各样，千变万化。显然，不可能将如此众多而复杂的油气藏类型一一简化，来满足建立油气渗流数学方程的需要，只有从众多而又复杂的不同类型的油气藏中找出它们的共性，才能由此建立起油气渗流的普遍规律。

1) 油气藏剖面上的简化

油气在储层中的流动特性是渗流力学最为关心的问题。从油气藏开发过程中流体在油气藏中可能发生的流动倾向看，可以将各种类型的油气藏简单地归纳为两大类：层状油气藏、块状油气藏。

层状油气藏主要指发源于陆相沉积盆地或海相沉积环境，通常具有多油层、多旋回的砂岩系列的油气藏。这类油气藏，纵向上由于受沉积韵律的控制常可分为多个油层组，一个油层组内又可以分为几个油层，而油层之内又可划分成若干个小层，小层之间常有泥岩类隔夹层存在。

在油气藏开发过程中，一般压差下，储层流体在储层中的流动通常难以穿越渗透性极低的隔夹层，可近似认为其仅仅是沿层面进行流动，纵向上流体的运动和物质交换可以忽略不计。因此，在渗流力学研究中，可以将这类层状油气藏看成一个等厚的薄板，这种简化的薄板模型就称为“平面等厚模型”，如图 1-5 所示。

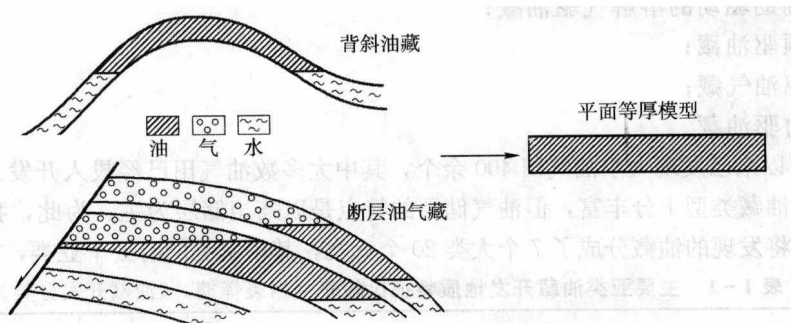


图 1-5 层状油气藏剖面简化模型示意图

将层状油气藏简化为平面等厚模型实际是将三维空间问题简化成了二维平面问题，为后续研究带来了极大的方便。但如果油气层的长度不是远远大于油气层的厚度或者油气藏的倾角比较大时，这种平面等厚模型的简化会对实际流动情况造成较大的误差，这时则应从三维空间来考虑油气藏的简化，使用另一种简化模型。

此外，对层状油层的简化还要考虑到多层系和多旋回的具体因素的影响，如大层内有若干小层和夹层，且层间有越流等。

块状油气藏主要是指储集空间为缝洞系统的碳酸盐岩类油气藏，也包括储集空间主要为裂缝系统的泥岩类、火山岩类特殊油气藏。块状油气藏的厚度通常较大，同时，由于成岩后期的溶蚀作用、白云化作用及构造应力的破裂作用，常常使这类油气储层在相当大的厚度范围内（可达数百米）发育连通性较好的缝洞系统。油气藏开发过程中，块状油气藏中流体的流动会在三维空间中发生（如底水上升）。

因此，研究块状油气藏中流体流动时，必须考虑流体在纵向上的流动和物质交换，油气藏的简化须使用三维空间模型（包括径向距离 r 、垂向距离 z 和幅角 θ ）。如果研究的问题是

轴对称的, θ 角的影响可以忽略不计, 则三维渗流问题转化成含两个自变量的渗流问题。这样典型化后的模型称为“厚度模型”。

2) 油气藏平面上的简化

实际油气藏投影在平面上的几何形状通常十分复杂, 也可能很不规则。为了研究问题的方便, 通常把复杂的油气藏平面几何形状简化为规则几何形状, 如条带形、圆形、椭圆形和扇形, 如图 1-6 所示。一般来说, 若油气藏的长轴与短轴之比小于 3, 则将其简化成圆形油气藏; 若长轴与短轴之比大于 3, 则简化成椭圆形或条带形油气藏。但是, 油气藏平面形态的简化并非如此简单, 通常要视具体地质情况以及研究的目的而定。

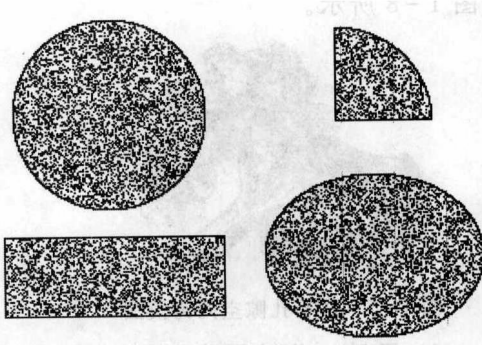


图 1-6 油气藏平面形状简化模型示意图

上述油气藏几何形状的简化主要是为了理论研究的需要而提出的。在当今高速计算机普遍应用的年代, 在油气藏数值模拟研究中, 不管油气藏边界形状多复杂, 数值模拟技术都能建立真实的油气藏模型, 并完成需要的油气藏工程研究。因此, 在先进的油气藏工程研究技术中, 也可不将油气藏形状进行如此的简化。

第二节 油气藏内部储集空间结构的简化

储层是油气藏的核心, 是储存油气的容器。储层之所以能储渗油气, 是因为其内部存在未被固体物质占据的孔隙空间 (储集空间), 而油气正是储存和流动于岩石的孔隙空间之中。储层内部孔隙空间的大小、形状、连通性和发育程度等从根本上决定着流体在孔道中的渗流形态和渗流规律。不同的岩类有着不同的储集空间类型和结构特征。因此, 清楚认识油气储层中的储集空间结构特征是研究和认识油气渗流特征和规律的基础。

一、储层及储集空间类型

1. 储层类型

迄今为止, 人们在几乎所有类型的岩石中都找到了油气。这就是说, 地壳上的各种岩类都有可能成为储存油气的岩层。能储存和渗滤油气的岩层就称为储层。

统计资料表明, 世界上已发现的油气藏中, 碎屑岩和碳酸盐岩是最主要的储层类型, 二者控制的油气储量与产量均占世界总量的 99% 以上, 其他岩类所控制的油气储量不足 1%。除碎屑岩和碳酸盐岩储层外, 还发现一些特殊岩类的储层, 主要有火山岩类储层、变质岩类储层及泥质岩类储层。

2. 储集空间类型及大小分类

所谓储集空间, 是指岩石中未被固体物质充填的孔隙空间, 简称孔隙, 如图 1-7 所示。严格说来, 地壳上所有岩石都具有孔隙, 即使象花岗岩那样致密坚硬的岩石, 也不可能毫无孔缝。但是, 不同的岩石, 在内部孔隙空间的大小、形状和发育程度等方面可能差异巨大。

1) 储集空间类型

从成因上看, 油气储层的储集空间类型主要有以下三种: 孔隙、裂缝和溶蚀孔洞, 如图 1-8 所示。

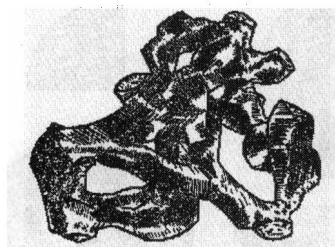


图 1-7 岩石孔隙空间铸模图



图 1-8 储集空间类型示意图

(1) 孔隙: 指碎屑岩颗粒间存在的空隙, 又称粒间孔, 是一种原生孔隙。孔隙的大小及发育程度主要受原始沉积、成岩条件的影响。孔隙是砂岩类储层的主要储集空间类型。

(2) 裂缝: 指岩石中因成岩改造或构造变形形成的缝隙。砂岩储层和碳酸盐岩储层都可能发育裂缝。裂缝对储层储渗性能的影响取决于裂缝的大小和发育的规模。

(3) 溶蚀孔洞: 包括两种孔隙类型, 其一是发育于砂岩储层中的颗粒之间和颗粒内部的溶蚀孔隙; 其二是发育于碳酸盐岩储层中的溶蚀孔洞。一般而言, 碳酸盐岩储层中溶蚀孔洞的规模远比砂岩储层中的粒间溶孔、粒内溶孔大, 如图 1-9 所示。

碳酸盐岩储层中溶蚀孔洞大小变化极大, 非均质性很强。一般溶孔的直径大小在几到几百毫米, 而大型溶洞的直径可达几十米。例如, 塔河油田对 39 口井奥陶系灰岩的洞穴发育情况统计结果表明, 51 个洞穴的直径大小范围在 0.22~67.1m, 平均为 5.0m。

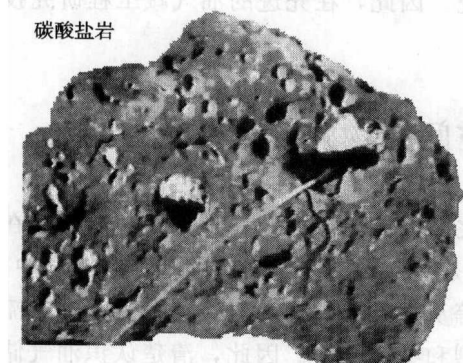


图 1-9 碳酸盐岩储层溶洞示意图

裂缝和溶蚀孔洞都属于次生孔隙, 是在沉积岩形成之后, 因淋滤、溶蚀、交代、溶解及重结晶等物理、化学作用在岩石中形成的孔洞和裂缝。

2) 储集空间大小分类

油气田开发实践证明, 储层储、渗性能好坏主要取决于储层孔隙的大小和结构特征, 即孔隙大小影响储层的储集能力, 而孔隙间的连通性和孔喉之比等因素则影响储层的渗透性。

由于储层岩石的孔隙大小具有高度分散、高度非均质的特征, 不是所有的孔隙对油气的储、渗都是有效的, 如岩石中的“死孔隙”及极细小的孔隙都是无效孔隙。根据储层孔隙的大小和储、渗流体的能力, 可将其分为如下 3 类。

(1) 超毛细管孔隙: 孔隙直径大于 0.5mm, 裂缝宽度大于 0.25mm。流体在重力作用下可以在其中服从流体静力学定律自由地流动。疏松砂岩中的孔隙、大溶洞、大裂缝等属此类。

(2) 毛细管孔隙: 孔隙直径 0.5~0.0002mm, 裂缝宽度 0.25~0.0001mm。由于毛细管阻力大, 流体在这种孔隙中不能自由流动, 必须施加外力克服毛细管阻力, 才能流动。一

般砂岩孔隙属此类。

(3) 微毛细管孔隙：孔隙直径小于 0.0002mm ，裂缝宽度小于 0.0001mm 。由于孔隙、裂缝太小，流体在其中处于物质分子作用范围内，欲使流体在其中流动，必须施加非常高的压力，这在油层条件下难以达到，故流体在这类孔隙中无法流动。这类孔隙属于无效孔隙。泥岩、页岩中的孔隙属此类。

二、储集空间组合类型及其简化

油气储层内部空间结构极其复杂。孔隙、裂缝和溶蚀孔洞三种储集空间类型可以组合成多种储集空间结构。从已开发油气藏的储层特征看，可按三种储集空间类型的组合关系将油气储层分为三种介质七种结构，即单纯介质、双重介质和多重介质。其中，单纯介质包括纯孔隙结构、纯裂缝结构和纯溶洞结构；双重介质包括裂缝—孔隙结构、溶洞—孔隙结构和裂缝—溶洞结构；三重介质为孔隙—裂缝—溶洞结构。

1. 纯孔隙结构

这种结构一般存在于砂岩油藏中，油气的储集和渗流空间均为孔隙，如图 1-10 所示。

对于纯孔隙结构储层，由于孔隙大小分布是随机而不规则的，其对油气渗流的影响也极难预测，为此，人们提出了种种模型来简化这种储层结构。最早的简化模型是把岩石看成是由等直径的圆球颗粒组成的，流体在这些圆球的间隙中储集和流动，这种结构模型称为“假想结构模型”（假想土壤）；进一步的简化是将岩石中连通的孔道看成等直径毛细管，岩石由这些等径毛细管束所组成，因而可以把一般管道的水动力学运动规律引入到渗流力学中，这种简化模型称为“理想结构模型”（理想土壤），如图 1-11 所示。显然，这种假设与实际情况还有很大差距，因为实际孔道既不是等径的、也不是直的。人们进一步作了修正，引入了变直径的、弯曲的毛细管束模型，称其为“修正理想模型”，如图 1-11 所示。这种修正模型可以用于一般渗流规律的研究。事实证明，这些简化模型对渗流力学的研究都非常有意义。



图 1-10 砂岩储层孔隙示意图

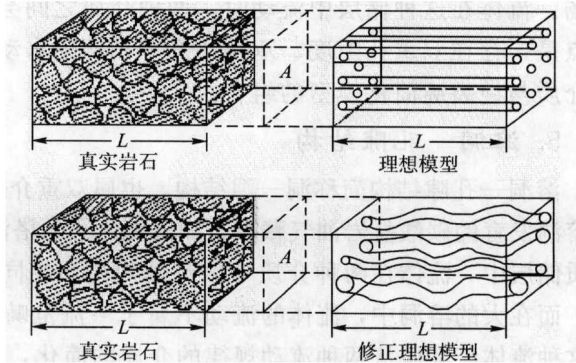


图 1-11 孔隙性储层及其简化模型示意图

2. 纯裂缝结构

这种结构一般出现在致密的碳酸盐岩或泥岩类油气藏中，如图 1-12 所示。这类储层的基质孔隙度和渗透率都非常低，基本上不具有储渗性。其油气的储存空间和流动通道主要为岩石破裂形成的裂缝系统，故称为“纯裂缝结构”。由于裂缝特殊的长条形态及组系结构，这种储集空间常用规则的网格进行简化，简化的储层岩石被分割成多个立方体，如图 1-13 所示。

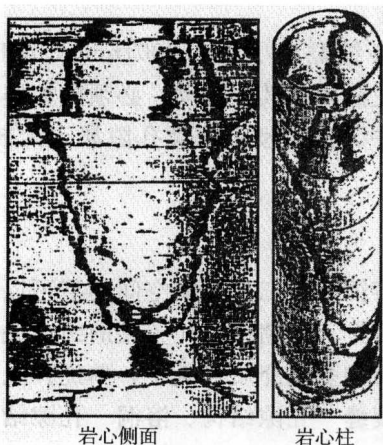


图 1-12 裂缝性储层岩心示意图

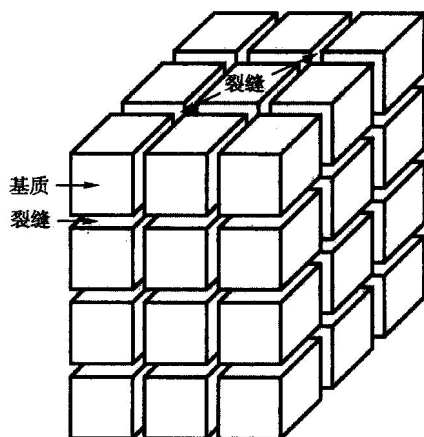


图 1-13 裂缝型储层简化模型

3. 纯溶洞结构

这种结构多发育于碳酸盐岩储层中，如图 1-9 所示。严格地讲，在大型溶洞中的流动已不属于渗流范畴，其流动规律应遵循 Navier - Stokes 方程。

4. 裂缝—孔隙结构

裂缝—孔隙结构简称缝—隙结构，是双重介质中的一种，如图 1-14 所示。

这种结构主要出现在裂缝、溶孔同时发育的碳酸盐岩储层中，在石灰岩、白云岩油气层中最为常见。四川碳酸盐岩气田中普遍存在这种双重介质储层。此外，在某些砂岩油气藏中，构造局部（如弯曲度较大的构造顶部）因构造应力的作用而产生大量裂缝后，也可能出现孔隙—裂缝双重介质结构。需要注意的是，由于构造变形的影响，不少砂岩储层都发育有裂缝，如果裂缝的大小和规模对油气的储渗影响甚微，在这种情况下，就不能视其为双重介质。

流体在这种双重介质中渗流会形成两个渗流场：基质孔隙介质中的流场、裂缝介质中的流场。流体在这种储层中流动时，两种介质之间会发生流体交换。因而，裂缝—孔隙介质的特点是：存在双重孔隙度、双重渗透率和两个水动力学场。裂缝—孔隙介质简化模型为纯孔隙介质与纯裂缝简化模型的组合。

5. 溶洞—孔隙结构

溶洞—孔隙结构简称洞—隙结构，也属双重介质中的一种。这种介质结构通常出现在有大型溶洞发育的碳酸盐岩油气藏中，如前面介绍的塔河油田奥陶系灰岩储层。因此，在这种双重介质储层中，流体在两种介质中的流动规律不相同。在孔隙介质中，流体的流动属于渗流范畴；而在大的溶洞中，流体的流动不属于渗流范畴，其运动规律应遵循 Navier - Stokes 方程。对这种流体流动服从两种流动规律的介质的简化，最简单的方法是把大小不等、形状不规则、分布杂乱的洞穴，简化为均匀分布在孔隙介质中的大小相等的连通圆球，如图 1-15 所示。

6. 裂缝—溶洞结构

裂缝—溶洞结构简称缝—洞结构，属双重介质中的一种。这种储层的储集空间不仅是双重的，且流体在每种介质中的流动规律也不相同。在裂缝介质中流体的流动属于渗流范畴，而在溶洞中的流动不属于渗流范畴，其流动规律应遵循 Navier - Stokes 方程。裂缝—溶洞储层的简化模型为裂缝简化模型与溶洞简化模型的组合。

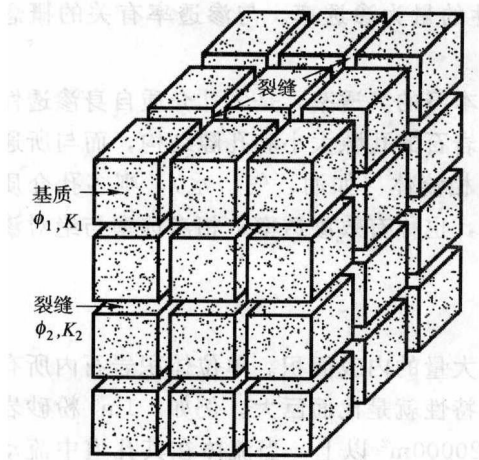


图 1-14 裂缝—孔隙型储层简化模型

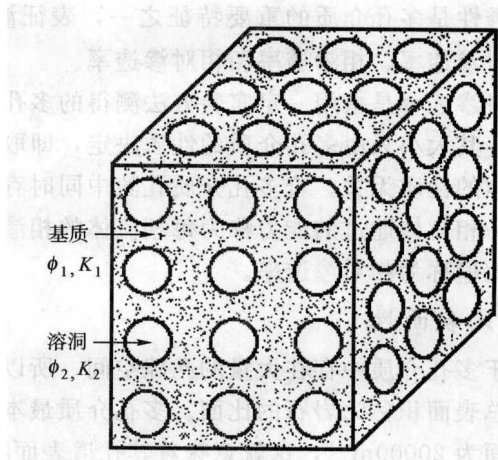


图 1-15 溶洞—孔隙型储层简化模型

7. 孔隙—裂缝—溶洞结构

孔隙—裂缝—溶洞结构简称隙—缝—洞结构。这种结构是三种单纯介质（孔隙、裂缝和大溶洞）组合在一起的混合结构，发育于碳酸盐岩油气藏中。目前，油气在这类储层中的渗流规律研究甚少，还处于探索阶段。

第三节 多孔介质及连续介质场

从前面储集空间的简化可以看到，油气储层有着极其复杂的内部空间结构，孔隙大小和形状都具有极大的不确定性，难以准确测量和描述，而要定量地描述流体在储集空间中流动时所发生的各种微观物理现象则更为困难。因此，油气渗流力学研究中需要采用一些方法来解决上述困难，连续理论就是渗流力学用来研究流体在多孔介质中的流动规律的一种最基本的方法。本节的主要任务是明确多孔介质概念和连续介质抽象方法。

一、多孔介质及其特点

多孔介质是指内部含有许多微小孔洞，孔洞之间具有一定程度的连通性，在一定条件下，流体可以通过微小孔洞进行流动的固体介质。多孔介质一般定义为由毛细管或微毛细管组成的介质。油气储层是一种典型的多孔介质。从油气储集和渗流的角度看，多孔介质具有如下一些重要特性。

1. 储容性

多孔介质以固相介质为骨架，包含一部分孔隙空间，这部分孔隙空间可以被单相或多相物质所占据，但其中至少有一相是流体。

多孔介质最重要的特点之一是储容性，即储存和容纳流体的能力。显然，多孔介质储容性的好坏和孔隙空间的大小有关。孔隙度和岩石的压缩系数就是表征多孔介质储容性的重要的宏观物理量。

2. 渗透性

多孔介质的孔隙空间至少有一部分是互相连通的，一定条件下流体能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做多孔介质的渗透性。

渗透性是多孔介质的重要特征之一，表征渗透性的量为渗透率。与渗透率有关的概念有：绝对渗透率、相渗透率和相对渗透率。

绝对渗透率是指用一定实验方法测得的多孔介质本身的渗透率，是多孔介质自身渗透性的反映，其大小只由多孔介质的性质决定，即取决于岩石的孔隙大小和孔隙结构，而与所通过的流体的性质无关。若多孔介质孔隙中同时存在多相流体（如油、气、水），则多孔介质允许每一相流体通过的能力称为每相流体的相渗透率，也称有效渗透率；相渗透率与绝对渗透率的比值称为相对渗透率。

3. 比表面性

由于多孔介质中存在大量的孔隙空间，所以存在大量的内表面积。单位体积岩石内所有颗粒的总表面积称为岩石的比面。多孔介质最本质的特性就是比面巨大。例如， 1m^3 粉砂岩中的比面为 20000m^{-1} ，这就意味着其孔道表面积在 20000m^2 以上，当流体在其孔道中流动时，流体与固体颗粒间的相互作用会使流体流动的渗流摩擦阻力很大。从很多方面来看，多孔介质巨大的比面在很大程度上决定了多孔介质中流体的动态。

4. 孔隙结构复杂

孔隙空间结构复杂是多孔介质的另一个基本特性。

从油气储层看，不同类型的储层，在其岩石骨架的成分、形状及表面粗糙度等方面差异巨大，因此，不同成因类型的孔隙（如粒间孔、裂缝、溶蚀孔洞），其大小、形状、连通度、迂曲度及孔喉比等因素各不相同，这就使多孔介质的孔隙结构变得极为复杂和难以预测，给渗流力学的深入研究带来很大的困难。

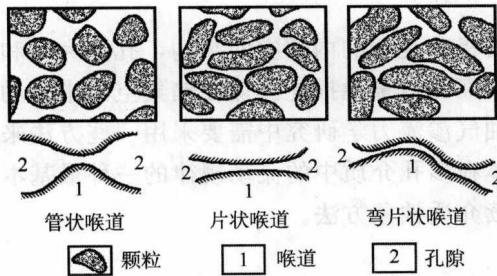


图 1-16 储层孔隙、喉道示意图

从储集空间角度看，多孔介质可以看成是由被称作孔隙的较大空间组成的，而这些较大空间又与被称作喉道的较小空间或收缩区间相连通，如图 1-16 所示，这就增加了流体在其中流动的阻力。正是因为多孔介质具有孔隙结构复杂和比表面大这两大特性，从而决定了流体在多孔介质中具有渗流阻力大、渗流速度小的流动特点。

二、连续介质场

所谓连续介质方法，就是将某一尺度范围不连续的介质，通过研究尺度的粗化或放大，将其处理为连续介质的方法。显然这种连续性是相对的，与所研究的内容和层次密切相关。在渗流力学的研究中，可将研究尺度分成三种水平，即分子水平、微观水平和宏观水平。

分子水平是指以分子为对象，研究介质物理现象的研究层次；微观水平是指以质点（微小体积中的分子集合）为对象，研究介质物理现象的研究层次；宏观水平则是以表征体元为对象，研究介质物理现象的研究层次。

下面将依次从分子水平到宏观水平逐步分析，阐明连续介质方法及该方法在多孔介质中的应用。

1. 连续流体

从分子水平上看，流体是大量分子的集合体。流体内的分子一刻不停地作着杂乱无章的

布朗运动。原则上讲，可以用经典力学方法，研究单个流体分子的动力学规律，即用一个时刻分子所处的位置推算下一个时刻分子的位置。但是，这种方法理论上可行，实际上却难以实现。例如，1mol 气体中有 10^{23} 个分子，若以单个分子为研究对象，由于方程数目大，就是应用计算机，要研究每个分子的位置和力矩，也会很困难。

显然，在分子尺度范围，无法完成流体性质及其运动规律的研究，需要用另一种方法来处理。该方法是上升一个研究尺度范围，即不以分子为对象，而着眼于由分子微团构成的质点上。用质点的运动形态来代替单个分子的运动形态进行研究时，就可以使用宏观统计学方法。根据质点的运动规律，将其平均化处理后，就能以质点的平均性质推断大量分子集合体——流体的性质和运动规律。

把流体处理成连续介质，从本质上讲，就是把质点看成一个微小体积中的分子集合体。质点的尺寸比分子的平均自由程大得多，但又比所研究的流体区域小得多。这样，质点内的流体和流动性质就是所有分子性质的平均统计值，这些数值与质点的质心（质量中心）有关。在流体占据区的每一点上，都存在一个具有一定动力学性质和能量性质的质点。这些质点均匀地充满整个流体区，而使流体成为连续介质，即连续流体。

那么质点的尺寸究竟该取多大或多大范围才能保证流体是连续的？当要解决质点大小问题时，就必须把质点考虑成一个物理点（物质点），该点可以用流体的密度来定义。在物理点内流体是连续的。

密度是一部分物质的质量 Δm 和它占据的体积为 ΔV 的比值。假如要研究一个物理点，并希望由它给出一个密度值 ρ ，则这个值代表的是某个流体体积的性质，这个点则是所选定体积的质心。

在流体中任取一点 p ，令其质量为 Δm_i ，体积为 ΔV_i 。对 ΔV_i 来说， p 是一个质量中心，流体在 ΔV_i 中的平均密度：

$$\rho_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta V_i} \tag{1-1}$$

显然，假如 ΔV_i 很大，也就是说全部流体体积的数量级都很大，这样得到的密度是很大体积密度的平均值，那么这个密度对于要定义的 p 点邻近的密度来说是没有意义的，在非均质流体中更是如此。

为了使 ρ_i 能代表 p 点附近流体的性质，必须确定 ΔV_i 到底多小才合适，因此，必须围绕 p 点减小值，令 $\Delta V_1 > \Delta V_2 > \Delta V_3 > \dots$ ，按此系列可计算出相应的 ρ_i ($i = 1, 2, 3, \dots$)，结果如图 1-17 所示。

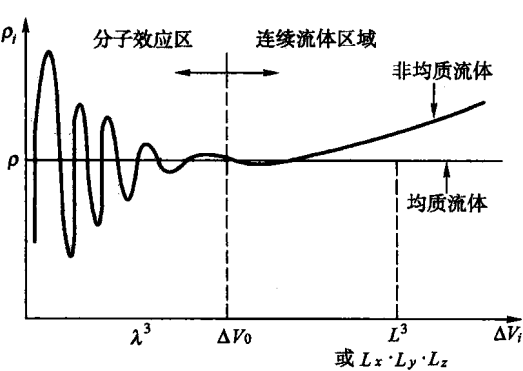


图 1-17 连续流体定义示意图

从图 1-17 可见，当减小 ΔV_i 到一定程度时， ρ_i 值不随 ΔV_i 的变化而变化，趋于一个常数 ρ 。如果 ΔV_i 进一步减小，以致于 $\Delta V_i < \Delta V_0$ （某临界值）时， ΔV_i 中包含的分子数显得如此之少，以致 ΔV_i 的微小变化，都会对 ρ_i 产生显著影响。这种影响出现在 ΔV_i 的特征长度尺寸等于分子间平均距离 λ （即分子自由程）的时候。当 $\Delta V_i \rightarrow 0$ 时，可以观察到 ρ_i 有很大的波动，此时， ρ_i 是没有意义的。