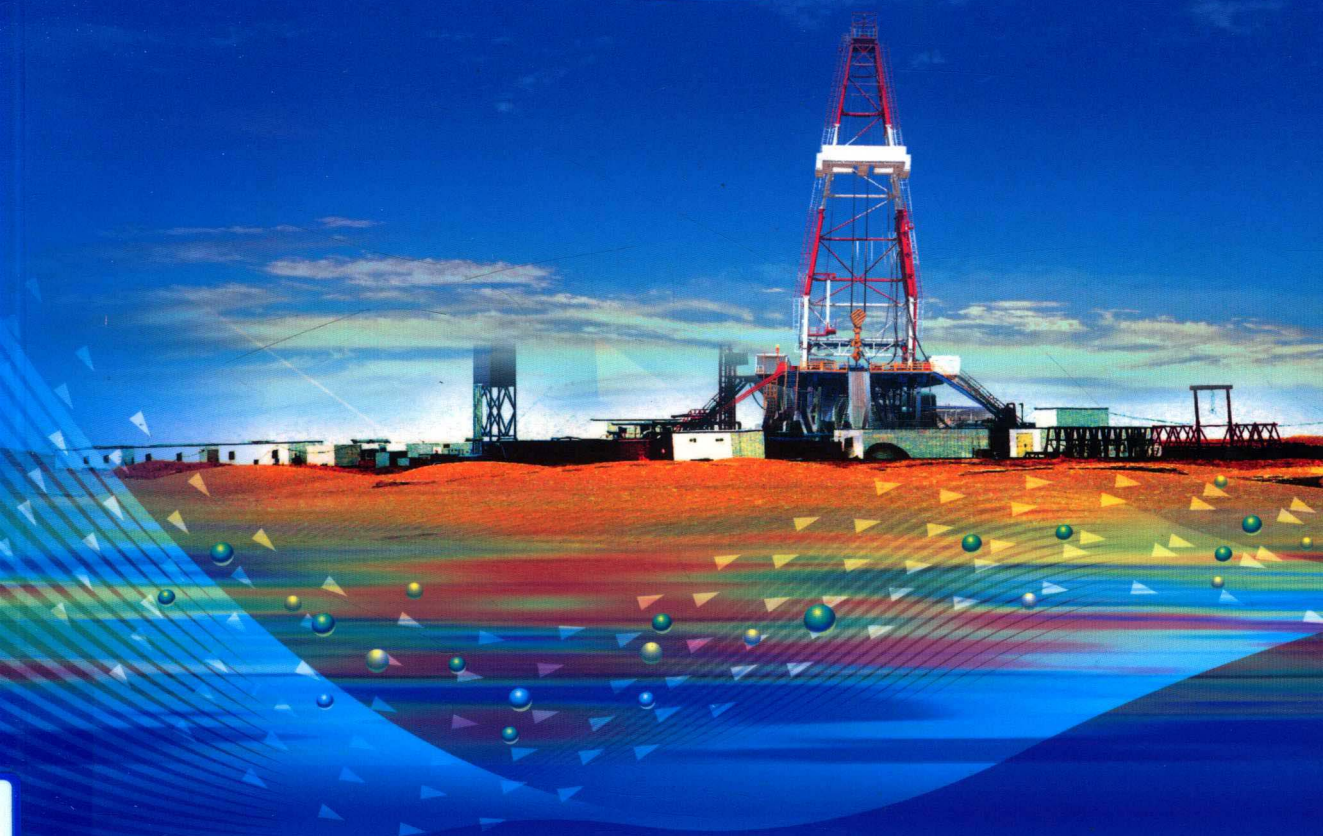


中国石油大学(北京)教改项目留学生教材建设资助

地下储层渗流力学

DIXIA CHUCENG SHENLIU LIXUE

郭小哲 ◎主编



石油工业出版社

京) 教改项目留学生教材建设资助

地下储层渗流力学

郭小哲 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在现有《渗流力学》各教材基础上,进行了精简和补充。精简力争做到使机理、概念、公式推导等更为简明及清晰。补充主要体现在:基本概念单独介绍;关键参数的数值给定;公式的现场实际应用;复杂介质、物理化学、非常规油气等渗流特征及数学模型的建立;与其他课程的关键衔接;渗流实验的原理和步骤;基本关键词的中英俄三语的对照;渗流力学中著名科学家简介。整体内容庞大,领域全面,但坚持由简入深,突出渗流特征、描述基本数学模型建立过程,并努力做到思路统一、知识普及、拓宽视野、把握基本的目的。

本书适用于想了解渗流力学的读者,特别适用于本科国内学生、国际留学生等的教学参考,也适合作为科研方面的基本理论参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地下储层渗流力学 / 郭小哲主编. —北京:石油工业出版社, 2018.11

ISBN 978-7-5183-2911-3

I. ①地… II. ①郭… III. ①地下渗流力学 IV.

① 0357.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 219461 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.com

编辑部: (010) 64523535

图书营销中心: (010) 64523633

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

2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 23.25

字数: 595 千字

定价: 78.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

关于《渗流力学》方面的教材已经有很多，都是名门大家长期教学和科研的精髓总结，也是本书的重要参考。

本书与现有渗流力学的不同之处在于以下几个方面：

- (1) 把分散在正文中的重要概念抽取出来列在每部分的开始；
- (2) 给出关键参数的具体数据，并代入公式计算，用具体数据分析计算结果的特点；
- (3) 使数学模型建立和公式推导思路和逻辑更清晰；
- (4) 加入了纳米驱油、煤层气、页岩油气、致密油气、地热、天然气水合物、水溶气等前沿领域渗流数学模型内容；
- (5) 加入了渗流力学与其他课程的紧密关联内容；
- (6) 加入了渗流实验内容；
- (7) 补充了渗流力学关键词的中文、英文、俄文多语对照；
- (8) 加入了流体力学、渗流力学中涉及的科学家简介。

由此，概括本书的特点主要体现在 10 个方面：

(1) 概念性。渗流力学中涉及的储层、流体、岩石、力和能量等基本参数的概念，以及各定律、各方程、各物理现象等的概念，在书中都尽可能详细给出，并单独列于每节的“概念”部分，以便增加读者对基本知识的回顾和了解。

(2) 实数性。对涉及的渗流力学关键参数，尽可能给出具体的实际数值和单位，以便读者有一个感性的认识，如储层深度 2000m、渗透率 50mD、储层厚度 5m、油井产量 $30\text{m}^3/\text{d}$ 等。

(3) 短句性。对现象、机理、规律、结果等的分析尽可能应用短句，用较浅显的语言表述问题，不展开或少展开，基本上不存在大段的论述，对于涵盖较多内容的情况采用条目列出，易于理解。

(4) 基础性。该书强调基础和基本，重点介绍基本概念、渗流机理、数学模型建立及经典渗流力学中的渗流规律介绍，公式的推导、模型的建立过程、复杂方程的求解等，有的略过直接给出结果，有的过程大大简化，对于复杂的渗流仅给出最为简单的模型，以说明建立过程中考虑的因素，没有做更进一步深化。

(5) 多面性。书中除了本科学习中的渗流基本规律、稳定渗流、多井干扰、不稳定渗流和油水两相渗流最为核心的五个部分内容外，更增加了关于储层、流体、岩石、力学分析等基本概念的认识，同时也增加了复杂介质渗流、物理化学渗流、非常规油气渗流、渗流在其他课程的应用以及渗流实验的相关内容，拓宽了知识面。

(6) 应用性。尽可能使读者明白建立渗流方程的目的、渗流规律解决的实际具体问题，也尽可能用例题或者计算或者讨论实现抽象理论问题的实用性。

(7) 前沿性。结合非常规储层的快速开发背景，特别针对页岩气、致密油、煤层气、页岩油、地热、天然气水合物、水溶气等各类储层，分别就资源特点、开发现状、渗流机理、

渗流模型的建立等进行了简要介绍,以便读者能快速地把握该类储层的基本特征,并为进一步研究奠定基础,此外,还引入了关于分形、纳米采油、体积压裂等相关知识和内容。

(8) 计算性。基于“实数性”和“应用性”,在传统的经典渗流力学中尽可能多地应用实际数据去计算相关参数,一方面增进学习者对抽象理论的感性理解,另一方面让学习者更加熟悉关键参数的单位换算。

(9) 国际性。为了适应国外留学生对渗流力学的学习,本书对单独列出的概念,及其他重要的学术关键词,进行了中文、英文、俄文的多语对照翻译,按章节附在了书后,以便读者参阅。

(10) 科普性。渗流力学学习过程中涉及了许多流体力学、物理学、力学、数学、热学等多个方面的著名科学家,他们在物理量单位、定律、方程、方法等方面具有突出贡献,科学和石油的结合让他们熠熠生辉,基于对这些巨人的崇敬,本书在每节的最后增加了“名人小知识”,介绍他们的生平和科学贡献,也使读者从中多些乐趣和激励。

基于以上特点,本书设计了每一节的结构,即介绍、概念、分析、例题(某些内容无此项)、名人小知识,核心的理论分析和模型建立在“分析”内容中。

为了便于读者分类学习,该书分出了基本概念、基础理论、经典渗流、复杂介质渗流、物理化学渗流、非常规油气渗流、理论应用、渗流实验,共8个部分,包括绪论共9章39节,以供读者参阅。

此外,本书还给出了约360个概念解释,约400个关键词多语对照,39个著名科学家简介。

在完成本书编写过程中,笔者课题组内学生高珍妮、郭斌、汪青鑫、李贤、李涛、卢佳伟、浦世雄、牛慧珍、罗威、吴林洪等在整理资料、编辑文字、绘制图表、稿件排版、查错补缺等方面做了大量工作。

本书中的内容重点参考了葛家理、程林松、翟云芳、刘慧卿等的关于渗流力学方面的教材,以及杨胜来《油层物理》、廖新维《现代试井分析》、张琪《采油工程原理与设计》、姜汉桥《油藏工程原理与方法》、岳湘安《提高石油采收率基础》、李春兰《石油工程实验指导书》。同时,还参考了许多期刊文献、毕业论文、网络信息等,在此对这些作者表示崇高敬意与深切感谢。

本书适用于致力想了解渗流力学的任何读者,特别适用于本科国内学生、国际留学生等的教学参考,也适用于科研方面的基本理论参考。

在编写过程中,基于“基础性”和“短句性”,对渗流机理、现象、模型建立及求解或多或少存在诸多关键缺陷,尤其是在非经典渗流力学方面,许多认识还不足,简单模型的给出不足以说明特定的科学问题、特殊的渗流规律和渗流特点的总结不到位,甚至某些内容存在原理性问题等,敬请读者批评指正。

2018年8月7日

目 录

第一章 绪论	1
第二章 基本概念	5
第一节 储层	6
第二节 储层内流体性质	10
第三节 储层岩石性质	19
第四节 渗流过程中的力学分析	25
第五节 渗流的基本概念	30
第三章 理论基础	36
第一节 渗流的基本定律	37
第二节 基本数学模型	43
第四章 经典渗流	55
第一节 单相液体的稳定渗流	56
第二节 多井干扰理论	74
第三节 单相微可压缩液体的不稳定渗流	99
第四节 油水两相渗流	127
第五节 天然气渗流	148
第六节 气水两相渗流	157
第七节 油气两相渗流	162
第五章 复杂介质渗流	170
第一节 裂缝—孔隙双重介质渗流	171
第二节 各向异性介质渗流	180
第三节 变形介质渗流	185
第四节 非均质储层渗流	192
第五节 分形渗流	197
第六节 水平井渗流	202
第六章 物理化学渗流	215
第一节 非牛顿液体渗流	216

第二节	非等温渗流	222
第三节	传质扩散渗流	229
第四节	多相多组分渗流	235
第五节	纳米驱油渗流	240
第七章	非常规渗流	245
第一节	页岩气渗流	246
第二节	致密油渗流	257
第三节	页岩油渗流	264
第四节	煤层气渗流	272
第五节	天然气水合物渗流	277
第六节	地热储层渗流	284
第七节	水溶气渗流	289
第八章	理论应用	295
第一节	油藏数值模拟的应用	296
第二节	现代试井的应用	301
第三节	采油工程的应用	306
第四节	油藏工程的应用	312
第五节	提高采收率的应用	322
第九章	渗流实验	329
第一节	水电相似原理	330
第二节	渗流实验模型	334
附录一	关键词“中英俄”文对照	343
附录二	符号说明	360
附录三	常用参数单位及相互关系	363
附录四	幂积分函数表	364
参考文献		365

第一章

绪 论

渗流力学是流体力学的一个分支，主要研究
流体在多孔介质中的流动。

一、渗流力学特点

与普通管流相比,它们既具有共同点又存在明显的差异。

共同点是流体的流动需要压力差,流量取决于流动过程中压差和能量的损耗。

相对于普通管流其不同点在于:

(1) 渗流通道是纳米级至微米($\text{nm} \sim \mu\text{m}$)级孔隙,孔隙分布极不均匀,孔喉连通复杂多变,流体质点运动轨迹弯弯曲曲,时快时慢;

(2) 渗流速度为微米每秒($\mu\text{m/s}$)数量级,一般属于层流;

(3) 表面分子力作用显著,毛细管作用突出,流动阻力较大,流动速度一般较慢,惯性力往往可忽略不计;

(4) 地下岩石储层中受力复杂,弹性力、重力、惯性力、黏滞力等综合其中,往往使渗流较难达到稳定;

(5) 多孔介质类型及复杂流体耦合,加剧了流动的复杂程度;

(6) 渗流环境多处于高温高压状态,岩石、流体、能量等都呈现高压物性;

(7) 渗流主体一般为多相流体,相态变化、物理化学变化等更突出了渗流的复杂性。

渗流应用在多个领域,如冶金、化工、水利、生物、建筑等,更多的是应用在地下岩石储层的多孔介质中,因此,有时也称为“地下渗流”“地下水力学”“地下水动力学”“油气渗流力学”“油藏渗流力学”“多孔介质流体力学”等,本书对象为地下储层中的油、气、水流动规律及物理化学现象,故命名为“地下储层渗流力学”。

二、渗流力学发展历程

(1) 1856年法国工程师达西公布了渗流力学基本定律——达西定律,奠定了理论基础;

(2) 20世纪20年代,开始形成石油天然气基本渗流理论;

(3) 1923年,列宾亲建立了气体在多孔介质中的渗流理论;

(4) 20世纪30年代,开始研究液体弹性和岩石压缩性影响各种布井方式下油井产量计算方法;

(5) 1935年,齐斯发表了非稳定渗流的研究成果;

(6) 1937年,麦斯凯特建立了均质液体、油气渗流的各种水动力学问题;

(7) 1942年,贝克莱—列维尔特提出了非活塞式水驱油理论;

(8) 1948年,谢尔加乔夫建立了弹性渗流理论;

(9) 1956年,溶解气驱及气顶驱渗流理论形成;

(10) 20世纪60年代,以中国为代表的陆相非均质砂岩渗流理论开始形成;

(11) 20世纪七八十年代,热采、 CO_2 驱、天然气驱、化学驱等提高采收率渗流基本理论相继形成;

- (12) 20 世纪 90 年代, 以中国为代表的化学驱渗流理论快速发展;
- (13) 21 世纪初, 复杂结构井、低渗透等渗流理论更为成熟;
- (14) 21 世纪 10 年代, 以页岩气、致密油等为代表的非常规储层渗流理论快速发展。

三、渗流力学内容

渗流力学涉及流体相态、液体性质及储层介质等差异, 渗流理论也有许多类型。

按流体相态: 单相液体稳定渗流、微可压缩单相液体不稳定渗流 (也叫弹性驱渗流)、天然气渗流、油水两相渗流、油气两相渗流 (也叫溶解气驱渗流)、气水两相渗流、油气水三相渗流、多相多组分渗流等。

按液体性质: 牛顿液体渗流、非牛顿液体渗流、传质扩散渗流、非等温渗流等。

按储层介质: 刚性储层渗流、弹性储层渗流、单一介质渗流、双重介质渗流、三重介质渗流、变形介质渗流、分形介质渗流、非均匀介质渗流、各向异性介质渗流等。

四、渗流力学解决问题

渗流力学是研究油气田开发规律的基础理论, 涉及多个方面, 具体解决的实际问题罗列如下 (但不限于以下):

- (1) 能够反映流体流动过程中的力学作用, 以便确定油藏驱动类型;
- (2) 能够用数学语言建立渗流模型, 为地层压力、饱和度、温度等的分布计算提供思路;
- (3) 能够从渗流机理角度研究提高开发效果的方法和手段;
- (4) 能够进行单井或多井的产量、井底压力变化预测;
- (5) 能够利用渗流力学建立的关键参数理论关系, 推算地层参数、边界、储量;
- (6) 能够依据渗流力学建立的理论进行油井措施及措施效果评价;
- (7) 能够协助制订合理的开采制度及开发方式;
- (8) 能够为解决诸如水锥、热采、体积压裂、凝析等特殊机理问题提供机理分析;
- (9) 能够为许多其他学科提供理论基础, 如现代试井、油藏数值模拟、油藏工程等。

五、本书章节结构

渗流力学的基础是: 高等数学、油层物理、油气田开发地质、流体力学。

渗流力学的后续应用是: 油藏数值模拟、现代试井、油藏工程、采油工程、提高采收率等。

目前, 越来越复杂的油气储层需要更符合实际的渗流模型, 复杂介质及复杂流体的相关渗流理论是对这一需求的支撑和挑战。

非常规储层的快速发展需要对其渗流机理有个基本的认识。

基于以上承前启后的关联, 设计了本书章节结构。



六、渗流力学的发展

从渗流问题出发, 渗流力学是由简到难的过程, 即:

- (1) 一维到多维 (包括分数维);
- (2) 单相到多相;
- (3) 供给边界到断层边界;
- (4) 圆形边界到直线边界;
- (5) 单一边界到复杂边界;
- (6) 线性到非线性;
- (7) 稳定到不稳定;
- (8) 刚性到弹性;
- (9) 单井到多井;
- (10) 液相到气相;
- (11) 单一介质到多重介质;
- (12) 各向同性到各向异性;
- (13) 均质到非均质;
- (14) 等温到非等温;
- (15) 牛顿液体到非牛顿液体;
- (16) 直井到水平井;
- (17) 单一黏性流动到物理化学渗流;
- (18) 解析解到数值解。

纵观以上由简单到复杂的过渡, 体现了渗流力学的发展越来越能忠实于储层渗流的特点, 其求解方法也将会更多地借助于计算机模型等。

仍借用葛家理教授在 2001 年的《现代油藏渗流力学原理》中对渗流力学的发展趋势的描述:

- (1) 用智能科学研究油藏渗流力学中的非数量问题;
- (2) 用信息科学辨识理论研究地下渗流黑箱中的非透明问题;
- (3) 用知识可视化理论形象思维科学研究油藏渗流中的非逻辑思维问题;
- (4) 用分形科学及混沌理论研究渗流力学中的非有序问题;
- (5) 从单纯介质渗流向变异介质渗流深化;
- (6) 从单组分流体向非牛顿、多组分流体、物理化学流体、非等温流体等的深化。

第二章

基本概念

该篇主要交代地下渗流的储层、流体、岩石等对象的特征及涉及的物性参数，为渗流力学的机理认识和结果分析提供简捷的概念理解和具体数值参考，同时分析渗流过程中的力学现象、流动形式及各种压力等的特征，为渗流力学数学模型的建立及渗流规律的提炼奠定基础。

第一节 储 层

一、介绍

我们从地下采出的油、气、水等流体都来自地层，它是由不同地质时代形成的岩石组成，有的几乎没有孔隙，无法存储流体，一般为泥岩或者页岩；有的孔隙较发育，具有流体存储的空间，由此形成了储层（也叫多孔介质），砂岩、碳酸盐岩是典型的储层，其他岩性也能形成储层，如图 2-1-1 所示。

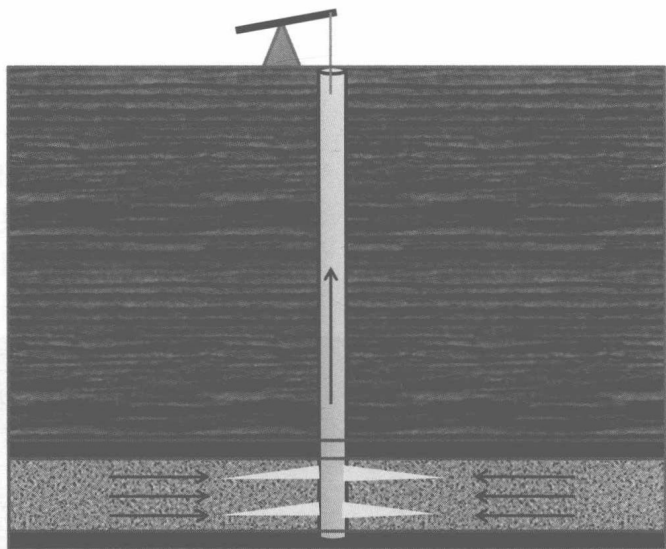


图 2-1-1 油气开采示意图

具有一定规模的储层才能形成工业开发的油气藏，它的深度 D 可由几百米到几千米，有一种分类为：小于 1500m 为浅层，1500 ~ 2800m 为中浅层，2800 ~ 4000m 为深层，大于 4000m 为超深层。

流体的储集空间是岩石孔隙，其孔径小的只有几纳米，大的可达几毫米，一般为微米数量级。描述孔隙发育程度的参数主要是孔隙度，页岩储层孔隙度一般小于 5%，致密储层多小于 10%，常规储层多在 20% 以上，高孔高渗透储层甚至可达到 30% 以上。

开采油气时，需要通过井筒连通储层，孔隙中的流体沿着孔隙通道流入井筒，继而流到地面。因此，孔隙的作用有两个方面：储集空间和流动通道。描述流动能力的参数主要是渗透率，其值范围很大，页岩储层中渗透率为 $0.001\mu\text{D}$ （微达西）至 0.01mD （毫达西），致密储层低于 0.1mD ，低渗透储层低于 10mD ，高渗透特高渗透储层许多都大于 500mD ，甚至达到几十达西。

二、概念

地层：是具有一定层位或形成时间的层状岩石的总称。

储层：由储集岩构成的岩层，是油气的储集场所和运移通道。

多孔介质：以固相为连续相，并含有大小不一、形状各异、互相连通的孔隙或裂缝或溶洞或两两组合或三个都有的介质。

地质构造：地下储层在空间上延展的特性，背斜、断块、单斜、鼻状等构造多为油气有利构造。

圈闭：能阻止油气继续运移，并使油气聚集起来的地质构造，一般由储层、盖层和遮挡物三部分组成，另一种说法是由生油层、储层和盖层组成，如图 2-1-2 所示。

油气藏：单一圈闭中具有同一压力系统的油、气占据的部分，如图 2-1-2 所示。

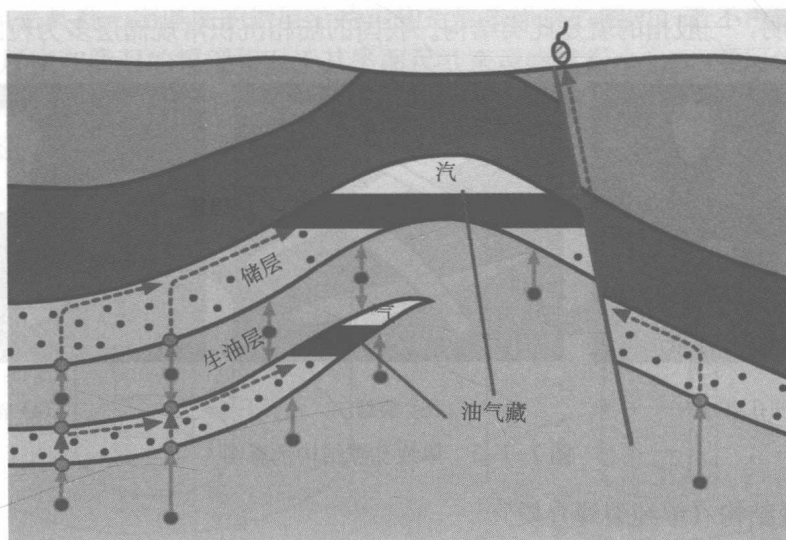


图 2-1-2 油气藏示意图

油气田：地面上一定连续的产油面积内各油气藏的总称。

孔隙度：岩石中孔隙体积 V_p 与岩石总体积 V_f 的比值，符号为 ϕ ，单位小数。

渗透率：岩石允许流体通过的能力，一般指岩石的绝对渗透率，符号为 K ，常用单位为 mD，国际单位为 m^2 。

有效厚度：指储层中具有工业产油能力的那部分厚度，单位是 m。有效厚度的薄厚有时依赖储层的物性判断，有的认为小于 1m 的为薄油层，大于 5m 的为厚油层，也有许多有效厚度能达到 30m，甚至 60m。

单纯介质：只存在一种孔隙结构的介质，如粒间孔隙、纯裂缝、纯溶洞。

双重介质：存在两种孔隙结构的介质，如裂缝—孔隙介质、裂缝—溶洞介质、溶洞—孔隙介质。

三重介质：存在三种孔隙结构的介质，溶洞—裂缝—孔隙介质。

封闭边界：指没有能量补充或没有流体穿过的边界，一般为断层、尖灭或不整合面。

供给边界：指有能量补充并有流体流入的边界，一般有底水、边水或者人工注水等。

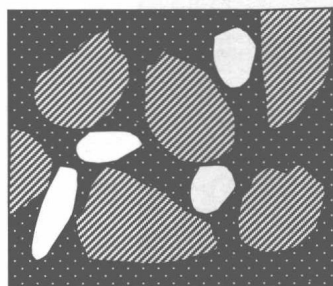
三、分析

1. 储层的内部孔隙结构

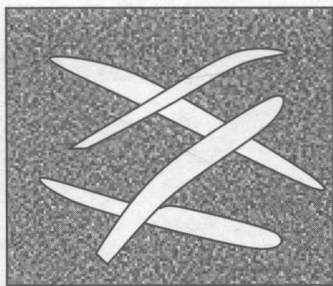
储层由多孔介质构成，内在的孔隙类型主要有三种：粒间孔隙、裂缝、溶洞。它们以单一、两两或全部的分类组合，形成了储层的7种结构。

1) 粒间孔隙结构（单纯孔隙介质）

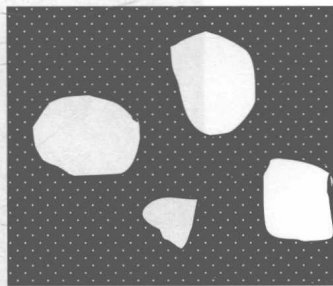
粒间孔隙结构多存在于砂岩油气储层中，如图2-1-3(a)所示，岩石碎屑颗粒（带斜线阴影部分）之间是胶结物（黑底白点）和粒间孔隙（白色部分），其中粒间孔隙是储层最主要的储集空间和流动通道，也是渗流力学中最主要的研究对象，若对储层不做孔隙类型的特别说明，一般指的就是此类结构。我国的陆相沉积常规储层多为粒间孔隙结构。



(a) 粒间孔隙



(b) 裂缝



(c) 溶洞

图 2-1-3 单纯孔隙结构示意图

2) 纯裂缝结构（单纯裂缝介质）

纯裂缝结构一般存在于致密的碳酸盐岩储层中，如图2-1-3(b)所示，裂缝（白色部分）分布于储层中，多按一定方向沿展，或者形成几组不同裂缝的相互交织网络，裂缝是储存油气的最主要空间和流动通道。中东、美洲的海相沉积储层多为此种类型。

3) 纯溶洞结构（单纯溶洞介质）

纯溶洞结构多存在于碳酸盐岩储层，如图2-1-3(c)所示，由于溶解作用而产生溶洞，其尺寸要比粒间孔大很多，流体在其中的流动规律也有较大差异，基于达西定律的渗流力学不把溶洞作为研究对象。

4) 裂缝—孔隙结构（裂缝—孔隙双重介质）

裂缝—孔隙结构是双重介质中最常见也是最重要的类型，双重介质一般指的是带有裂缝和粒间孔隙双重结构的储层，它是以粒间孔隙为主要储存空间，裂缝为主要渗流通道，常见于致密砂岩储层，部分页岩储层也发育该双重介质。裂缝来源于两个方面：天然裂缝和人工裂缝，非常规油气中的致密油、页岩气等均需要大型水力压裂形成裂缝网络才能开采出来，因此，渗流模型中多采用裂缝—孔隙模型。

5) 裂缝—溶洞结构（裂缝—溶洞双重介质）

它多发育于碳酸盐岩储层，溶洞和裂缝都较发育，大小不等、形状不规则、分布杂乱的洞穴是主要储集空间，裂缝把这些溶洞连通起来作为主要的渗流通道，溶洞中流体的流动不属于渗流力学范畴。

6) 溶洞—孔隙结构（溶洞—孔隙双重介质）

粒间孔也有部分是由于溶解作用产生的溶孔，也称为次生孔，若溶孔继续扩大即成为溶洞，则溶洞和孔隙共同存在，形成溶洞—孔隙结构，流体在孔隙介质和溶洞介质的流动规律不同，与裂缝—孔隙介质有根本上的区别。

7) 溶洞—裂缝—孔隙结构（三重介质）

这种结构常存在于碳酸盐岩储层中，一般应用较少。

2. 储层的外部几何形状

油气储层是具有一定厚度的岩层沿特定构造展布而成的圈闭，若不考虑垂向上的流动（由于储层的厚度和隆起的幅度相对于其平面尺寸来说常常很小），一般可以把储层投影到平面上，由此研究流体在平面上的运动规律。以背斜构造为例，投影后得到如图 2-1-4 所示的平面图。

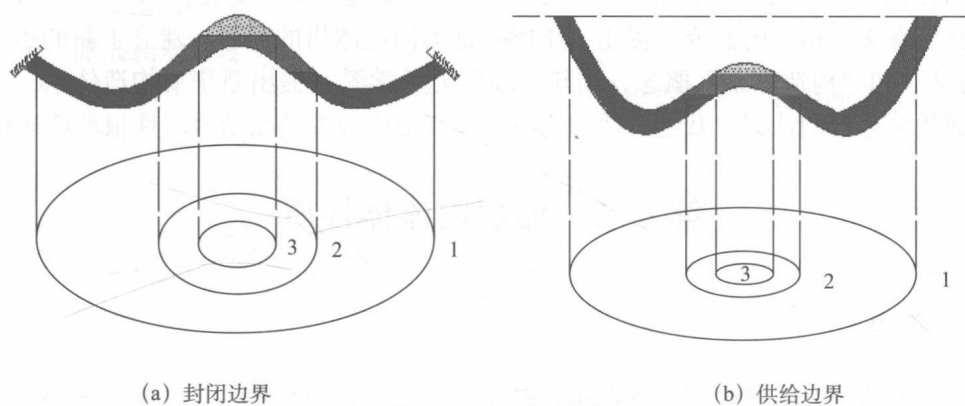


图 2-1-4 储层投影示意图

1号线为储层外边界；2号线为油水外边界；3号线为油气边界

若外边界封闭，即储层压力降低时边界外没有能量补充，该边界为封闭边界，如图 2-1-4 (a) 所示；若外边界连接较大水体，储层压力降低时边界外总有能量供给，该边界为供给边界，如图 2-1-4 (b) 所示。这两种外边界是渗流力学中经常用到的边界类型。

由于实际储层在平面上的投影得到的几何形状很不规则，为研究方便起见，常简化成两种规则几何形状：条带形和圆形。投影后的长轴与短轴比小于 3，则简化为圆形储层，它是平面径向流的地质模型，如图 2-1-5 (a) 所示；投影后的长轴与短轴比大于 3，则简化为条带形储层，它是平面单向流的地质模型，如图 2-1-5 (b) 所示。这两种简化类型在渗流力学中也是最常用的研究对象。

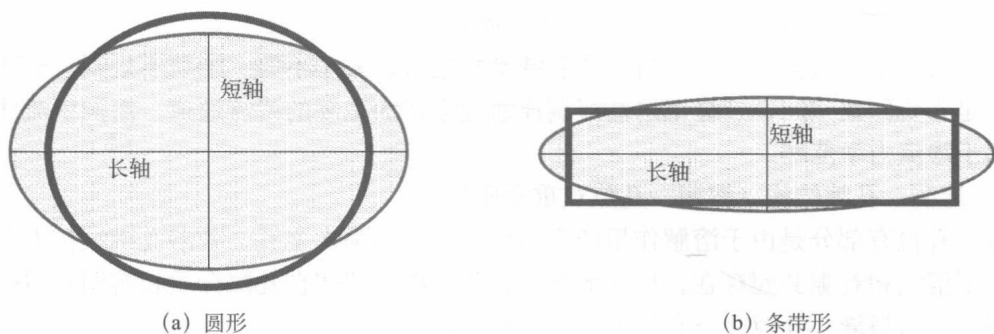


图 2-1-5 储层几何形状

四、名人小知识

李四光

李四光 (1889.10.26—1971.4.29)，中国湖北黄冈人，地质学家、教育家、音乐家和社会活动家，是中国地质力学的创立者，中国现代地球科学和地质工作的主要领导人和奠基人之一，新中国成立后第一批杰出的科学家和为新中国发展做出卓越贡献的元勋。

李四光创立了地质力学，并为中国石油工业的发展做出了重要贡献；早年对化石及其地层分层意义有精湛的研究，提出了中国东部第四纪冰川的存在，建立了新的边缘学科“地质力学”和“构造体系”概念，创建了地质力学学派；提出新华夏构造体系三个沉降带有广阔找油远景的认识，开创了活动构造研究与地应力观测相结合的预报地震途径。

第二节 储层内流体性质

一、介绍

储层内的流体分为液体和气体两类，其中液体主要指油和水，气体除了天然气主要成分之外，有的或含有较多的氮气、二氧化碳、硫化氢等无机气体，在渗流力学中不是特别说明气体成分外，一般是指烃类的天然气。

地下储层处于高温、高压状态下，储存于其中的流体物性与地面上的有很大差别：液态水不溶解气或者溶解很少，其物性与地面较为相似；液态油能溶解大量天然气，受压力变化影响，其黏度、密度、体积系数等变化较大；气态天然气具有很强的压缩性，压力敏感性很强，再加上油中的天然气溶解态与游离态的不断交换，使天然气的物性变化更为复杂。

描述流体性质的物性参数主要有：黏度、密度、体积系数、压缩系数、溶解气油比等。

二、概念

黏度：流体流动时由内部摩擦而引起的阻力大小，符号为 μ ，常用单位为 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 或