

高等学校教材

油气渗流力学学习指南

陈军斌 黄 海 主编

李 滢 主审

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

内 容 提 要

本书是李锐、陈军斌主编的《油气渗流力学》的配套教材，详细介绍了各章节的基本概念，分析了难点，提供了课后习题的详细参考答案。此外，本书精选了部分历年研究生入学考试真题，为学生进一步巩固所学知识提供帮助。

本书可作为石油工程、石油地质、地下水工程、油田化学等专业本科生以及报考研究生学生的教学辅导教材，也可供相关专业研究生教学参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气渗流力学学习指南/陈军斌，黄海主编．

北京：石油工业出版社，2010.6

高等学校教材

ISBN 978-7-5021-7768-3

I. 油…

II. ①陈…②黄…

III. 油气藏渗流力学—高等学校—教学参考资料

IV. TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 075075 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.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

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：8.25

字数：208 千字

定价：12.80 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

为满足石油工程专业学生、报考研究生学生的学习需要，本书是以李湟教授和陈军斌教授主编的教材《油气渗流力学》前七章为基础（第八、九、十章为选修内容），并查阅了大量的相关资料而编著的。

全书共分七章：渗流的基本规律、单相不可压缩液体的稳定渗流、刚性水压驱动下的油井干扰理论、微可压缩液体的不稳定渗流、天然气的渗流规律、水驱油理论基础和油气两相渗流（溶解气驱）。各章内容按学习引导、难点分析、习题详解三大模块编写。其中，学习引导主要介绍各章的基本概念、基本公式以及相关的参考信息；难点分析主要介绍各章的重点知识，也是学生难以理解的方面；习题详解主要给出了课后题详细的解题过程。此外，本书还精选了部分历年研究生入学考试真题和部分常用函数的C++程序，以供学生进一步学习和巩固。

本书的具体分工为：陈军斌教授负责各章节的难点分析部分内容；黄海博士负责各章节的学习引导部分内容；在习题详解部分，刘斌编写第一章、第三章、附录1内容，辛莹娟编写第二章、第六章内容，折海成编写第四章内容，吴亮编写第五章、第七章内容；李湟教授在百忙之中仔细审阅了全部内容，在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中，渗流力学教研室老师提出了许多宝贵意见，谨此表示感谢。

全书力求思路清晰，逻辑严密，内容丰富，题目典型。限于作者水平有限，书中错误之处在所难免，希望读者给予批评指正。

编 者

2010年3月

目 录

第一章 渗流的基本规律	1
一、学习引导	1
二、难点分析	5
三、习题详解	7
第二章 单相不可压缩液体的稳定渗流	9
一、学习引导	9
二、难点分析	12
三、习题详解	15
第三章 刚性水压驱动下的油井干扰理论	24
一、学习引导	24
二、难点分析	26
三、习题详解	35
第四章 微可压缩液体的不稳定渗流	41
一、学习引导	41
二、难点分析	43
三、习题详解	49
第五章 天然气的渗流规律	57
一、学习引导	57
二、难点分析	58
三、习题详解	63
第六章 水驱油理论基础	68
一、学习引导	68
二、难点分析	69
三、习题详解	71
第七章 油气两相渗流理论(溶解气驱)	77
一、学习引导	77
二、难点分析	77
三、习题详解	79
附录1 历年研究生入学考试真题精选(附参考答案)	83
附录2 几种常用函数的C++程序	118
参考文献	126

第一章 渗流的基本规律

一、学习引导

1. 渗流

渗流是指流体（液体、气体及其混合物）在多孔介质中的流动。它是现代流体力学的一个重要分支，是油气田开发、油藏数值模拟的理论基础。

2. 多孔介质

多孔介质是指由固体骨架以及相互连通的孔隙、裂缝所组成的材料。

3. 渗流力学的研究对象

渗流力学的研究对象是流体在多孔介质内的流动规律。

4. 渗流力学遵循的基本规律

渗流力学遵循的基本规律有达西定律、状态方程、连续性方程和能量守恒方程。

5. 双重孔隙介质

双重孔隙介质是指由孔隙介质和裂缝介质两个水动力学系统构成，且两个系统按一定规律进行流体交换的介质，又称裂缝孔隙介质。

6. 边水和底水

根据油、气、水的分布状况，把位于含油气边缘外部的水称为边水，当油气层较厚，地层倾角平缓时，油、水全面接触，整个含油边缘范围内的油气层底部都有托着油气的水称为底水。

7. 开放式油藏和封闭式油藏

如果油藏外围有天然露头并与天然水源相通，称为开放式油藏，外廓的投影称为供给边缘图 1-1。如果外围封闭（断层遮挡或地层尖灭）且边缘高程与油水界面高程一致，则称为封闭式油藏，其外廓称为封闭边缘（图 1-2）。

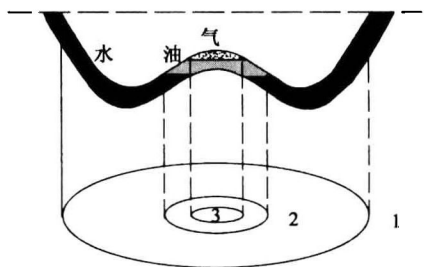


图 1-1 开放式油藏

1—供给边缘；2—计算含油边缘；3—含气边缘

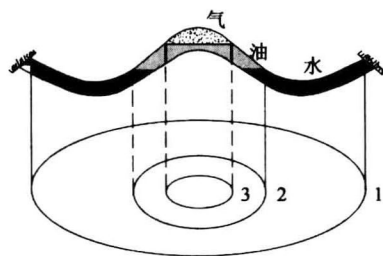


图 1-2 封闭式油藏

1—封闭边缘；2—计算含油边缘；3—含气边缘

8. 原始地层压力

油气层开采以前的地层压力叫原始地层压力，用 p_i 表示。原始地层压力一般是通过探井、评价井、资料井试油时，下井底压力计至油气层中部测得，也可以用试井法求得。原始地层压力的大小，主要决定于油藏的成藏条件、油层的构造部位和油层的埋藏深度，其大小表明了油层天然能量的大小。

9. 目前地层压力与静压

目前地层压力是指油气田在开发过程中某一时期的地层压力。油气井关井恢复压力，当稳定后所测得的油层中部压力叫静止压力，简称静压。静压是衡量油层开发水平的指标，因此需要定期进行监测。

10. 供给压力

供给压力是指油藏中存在液源供给区时，在供给边缘上的压力，用 p_e 表示。

11. 井底压力

井底压力是指油气井在正常生产过程中所测得的油气层中部压力，也叫流动压力，简称流压，用 p_w 表示。流入井底的油气就是靠流动压力举升至地面，因此流动压力是油井生产能力大小的重要标志。

12. 折算压力

折算压力是指将不同深度测得的地层压力折算到某一基准面（一般取海平面或油水接触面）的压力。折算压力计算公式为：

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

式中 p_r ——折算压力，Pa；

p ——表示为某点的地层压力，Pa；

Z ——离基准面的高度，m；

ρ ——地层流体的密度， kg/m^3 ；

g ——重力加速度， m/s^2 。

利用折算压力可以正确对比井与井之间的压力；用原始地层折算压力可以判断各井是否属于同一压力系统，即若各井的原始地层折算压力相等或相近，则同属于一个压力系统。

13. 油藏的驱动类型

(1) 弹性驱动：是指钻开油层后，地层压力下降，引起地层及其中液体发生弹性膨胀，体积增大，从而把原油从油层推向井底的驱动方式。弹性驱动是油藏的主要驱油动力之一。

(2) 溶解气驱动：是指依靠原油中分离出的溶解气膨胀推动原油流向井底的驱动方式。

(3) 气顶气驱动：是指依靠油藏气顶压缩气体的膨胀力推动原油流入井底的驱动方式。

(4) 水压驱动：是指依靠油藏的边水、底水、注入水的压力作用将原油从储层推向生产井井底的驱动方式。

(5) 重力驱动：是指依靠原油本身的重力作用将原油从储层推向生产井井底的驱动方式。

14. 静水压力

静水压力是指油气层中地层水液柱重力所产生的压力，用公式表示为：

$$p = 10^{-6} \rho_w g H$$

式中 p ——静水压力, MPa;
 ρ_w ——水的密度, kg/m^3 ;
 g ——重力加速度, m/s^2 ;
 H ——油水界面深度, m。

15. 流体压缩系数

流体压缩系数是指在温度恒定下表示改变单位压力流体体积的相对变化量, 用 C_L 表示, 即

$$C_L = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p}$$

式中 V ——孔隙中流体的体积, m^3 ;
 p ——孔隙压力, Pa;
 C_L ——流体压缩系数, Pa^{-1} 。

流体压缩系数是表征流体弹性能大小的物理量, 它是体积弹性模量的倒数。由于流体体积 V 是随压力 p 增加而减小的递减函数, 所以其导数为负值, 为了使 C_L 为正值, 前面需加负号; 又因为流体体积也是温度 T 的函数, 记作 $V(p, T)$, 所以上述公式中才会出现偏导数, 即 C_L 为等温压缩系数。

16. 岩石孔隙压缩系数

岩石孔隙压缩系数是指地层压力改变单位压差时, 孔隙体积的相对变化率, 定义为

$$C_t = \frac{1}{V_p} \frac{\partial V_p}{\partial p}$$

式中 V_p ——孔隙体积, m^3 ;
 p ——孔隙压力, Pa;
 C_t ——岩石孔隙压缩系数, Pa^{-1} , 压缩系数单位一般用 MPa^{-1} 。

国际上除前苏联外都把岩石孔隙压缩系数称为岩石压缩系数。

17. 流体与岩石的总压缩系数

流体与岩石的总压缩系数是指地层压力下降一个单位, 从单位孔隙体积中依靠油、气、水的膨胀以及孔隙体积的减小所驱出的流体总量, 用 C_t 表示。当油藏中油、气、水的饱和度分别为 S_o 、 S_g 和 S_w 时, 则有

$$C_t = C_f + C_w S_w + C_o S_o + C_g S_g$$

18. 渗流速度

渗流速度是指流体流量与多孔介质横截面积之比, 表示通过单位岩石截面积的流量, 用 v 表示, 即

$$v = \frac{Q}{A}$$

式中 v ——渗流速度, m/s ;
 A ——多孔介质横截面积, m^2 ;
 Q ——流体流量, m^3/s 。

19. 真实平均渗流速度

真实平均渗流速度是指流体流量与多孔介质孔隙平均横截面积之比, 其值等于渗流速度

与孔隙度的比值,用 v_i 表示,即

$$v_i = \frac{Q}{A\phi} = \frac{v}{\phi}$$

式中 v_i ——真实平均渗流速度, m/s;

ϕ ——孔隙度, 小数。

20. 岩石渗透性

岩石渗透性是指在一定压差下, 岩石允许流体通过的性质。岩石渗透性的大小用渗透率表示。渗透性是储层的重要特征之一, 渗透性的好坏对储层产能大小影响很大。

21. 渗透率

渗透率是指在定压差下, 岩石允许流体通过的能力。渗透率的值可根据达西定律确定。渗透率分为绝对渗透率和相对渗透率。

22. 绝对渗透率

绝对渗透率是指通过的流体为单一流体(一般为空气)时所测定的渗透率, 也叫空气渗透率。它是评价储层的重要指标。

23. 有效渗透率

有效渗透率是指当岩石中有两相以上流体共存时, 岩石允许其中某一相流体通过的能力, 也叫相渗透率。有效渗透率不仅与岩石性质有关, 而且与流体性质及饱和度有关。

24. 渗透率的量纲

取质量 M 、时间 T 和长度 L 为三个基本量纲, 则 $[Q] = L^3/T$; $[\mu] = \frac{M}{TL}$; $[\Delta p] = \frac{M}{T^2L}$, 所以有

$$[K] = \frac{[\mu][L][Q]}{[A][\Delta p]} = \frac{M}{TL} \cdot L \cdot \frac{L^3/T}{L^2 \cdot M/(T^2L)} = L^2$$

因此, 渗透率 K 具有面积量纲。在油藏工程 SI 制中用微米的二次方 (μm^2) 作为渗透率 K 的单位。

25. 相对渗透率

相对渗透率是指当岩石中有多相流体共存时, 每一相流体的有效渗透率与绝对渗透率的比值, 以小数或百分数表示。

26. 相对渗透率曲线

相对渗透率曲线是指表征相渗透率与饱和度之间变化关系的曲线。

27. 达西定律

达西定律是指流体通过多孔介质单位截面时, 其渗流速度与沿渗流方向上的压力梯度成正比关系, 表达式为

$$v = -\frac{K}{\mu} \frac{dp}{dL}$$

式中 v ——渗流速度, m/s;

L ——渗流路程, m;

p ——压力, Pa;

K ——渗透率, m^2 ;

μ ——流体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

$\frac{dp}{dL}$ ——沿渗流方向上的压力梯度, Pa/m 。

流体在多孔介质中符合达西定律的渗流称为达西渗流, 也称线性渗流; 不符合达西定律的渗流称为非达西渗流, 也称非线性渗流。

二、难点分析

1. 折算压力的引入

各井的原始地层压力不相等, 说明油藏各处的流体除具有压能外, 还具有其他能量。从流体力学中可知单位质量液体具有的总能量有比位能、比压能和比动能。若用点 M 表示某井油层中部位置, 选原始油水界面作为基准面, 用 Z 表示 M 点的标高, p 表示 M 点的实测压力值, ρ 表示油层条件下液体的密度, v 表示 M 点流体的流速, M 点单位质量流体所具有的总能量称为总水头 H , 则有

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

由于流体在油层中渗流时, 在孔隙通道中的流速是很小的, 数量级为 10^{-7}m/s , 而它的平方项与静水头相比就更小, 可以忽略不计, 因此上式可写成

$$H = Z + \frac{p}{\rho g}$$

即

$$p_r = \rho g H = p + \rho g Z$$

式中, p_r 称为 M 点的折算压力, 它表示 M 点的流体具有的总能量, 而 p 仅表示压能的大小。

2. 达西定律及达西公式

1) 达西实验条件

- (1) 渗流必须是稳定的;
- (2) 流体不能与多孔介质发生物理化学反应;
- (3) 必须是单相流动。

2) 达西公式

- (1) 一般形式:
- $$Q = \frac{AK\Delta p}{\mu L}$$

式中 Q ——通过砂层的渗流流量, m^3/s ;

K ——砂层渗透率, 它反映液体渗过砂层的能力, m^2 ;

A ——渗滤横截面积, m^2 ;

Δp ——两渗流截面间的折算压力差, Pa ;

μ ——液体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

L ——两渗流截面间的距离, m 。

砂层渗透率 K 只与岩石本身的孔隙结构有关, 而与其通过的流体性质无关。

(2) 微分形式:
$$v = -\frac{K}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx}$$

达西公式反映的是流体在多孔介质中流动时, 动力与阻力的相互制约的关系。

3) 渗透率 K 的物理意义

反映岩石允许流体通过的能力大小; 粘度为 $1\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的流体, 通过截面积为 1cm^2 、长度为 1cm 、两端压差为 760mm 汞柱的岩心时, 若其流量为 $1\text{cm}^3/\text{s}$, 此时岩心的渗透率定义为 1D 。

4) 达西公式的推广

推广 1——从一维流动推广到三维流动:

$$\begin{cases} v_x = -\frac{K_x}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \\ v_y = -\frac{K_y}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \\ v_z = -\frac{K_z}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \end{cases}$$

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k}$$

推广 2——从一维单相流动推广到一维多相流动:

$$\begin{cases} v_o = -\frac{K_o}{\mu} \frac{dp_o}{dx} \\ v_w = -\frac{K_w}{\mu} \frac{dp_w}{dx} \\ v_g = -\frac{K_g}{\mu} \frac{dp_g}{dx} \end{cases}$$

推广 3——从一维一相推广到三维三相:

$$\begin{cases} v_{xi} = -\frac{K_{xi}}{\mu_i} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial x} \\ v_{yi} = -\frac{K_{yi}}{\mu_i} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial y} \\ v_{zi} = -\frac{K_{zi}}{\mu_i} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial z} \end{cases} \quad (i \text{ 分别代表油、气、水})$$

达西公式右边有负号是因为渗流速度的方向总是和压力梯度的方向相反的, 即渗流速度的方向总是沿着压力下降的方向。

3. 达西公式的局限性 (适应条件)

达西定律表示压力损失完全由粘滞阻力决定, 这是符合多孔介质比面大这一特点的。当渗流速度较大时就不能忽略惯性损失了, 因此随着渗流速度的增大, 达西定律就会失效。

达西定律失效并不是说多孔介质发生了紊流, 而是由于层流条件下惯性损失大所致。

判定达西定律是否失效采用雷诺数 Re 这一准数。

$$Re = \frac{4\sqrt{2}\rho v \sqrt{K}}{\mu \phi^{3/2}}$$

若流体密度 ρ 单位为 kg/m^3 , 渗流速度 v 单位为 m/s , 渗透率 K 单位为 μm^2 , 粘度 μ 单位为 $\text{mPa} \cdot \text{s}$, 则雷诺数 Re 计算公式可以写为

$$Re = \frac{4\sqrt{2} \times 10^{-3} \rho v \sqrt{K}}{\mu \phi^{3/2}}$$

当 $Re \leq (0.2 \sim 0.3)$ 时, 渗流服从达西定律, 当 $Re > (0.2 \sim 0.3)$ 时, 达西定律受到破坏, 出现非线性渗流。

4. 非达西渗流

1) 二项式渗流定律

二项式渗流既考虑了粘滞阻力, 又考虑了惯性阻力, 能较好地反应实际。

$$\text{grad} p = -\frac{\mu}{K}v + b\rho v^2$$

式中, $\text{grad} p$ 为压力梯度, b 是取决于多孔介质特性的常数, 由实验确定。上式右边第一项表示粘滞损失, 第二项是惯性损失。当 $v \gg v^2$ 时, 二项式定律就退化为达西定律。

2) 指数渗流定律

$$v = C(\text{grad} p)^n$$

式中 C ——渗流系数, 与流体及多孔介质的性质有关;

n ——渗流系数, $0.5 \leq n \leq 1$ 。

随着渗流速度的增大, n 的值由 1 向 0.5 连续变化。由于在渗流过程中 n 、 C 不是常数, C 也要随着渗流速度的变化而变化。

三、习题详解

1-1 一圆柱岩样直径 $D=6\text{cm}$, 长 $L=10\text{cm}$, 渗透率 $K=2\mu\text{m}^2$, 孔隙度 $\phi=0.2$, 油沿轴向流过岩样, 油的粘度 $\mu_o=4\text{mPa} \cdot \text{s}$, 密度为 $800\text{kg}/\text{m}^3$, 入口端压力 $p_e=0.3\text{MPa}$, 出口端压力为 $p_w=0.2\text{MPa}$ 。(1) 求每分钟渗过的液量。(2) 求雷诺数 Re 。(3) 求粘度 $\mu_w=162\text{mPa} \cdot \text{s}$ 、密度 $\rho=1000\text{kg}/\text{m}^3$ 的水通过岩样是的雷诺数 (其余条件不变)。

解: (1) 由达西定律知

$$V = Q = \frac{AK\Delta p_t}{\mu L} = \frac{\pi \times (6 \times 10^{-2})^2}{4} \times \frac{2 \times 10^{-12} \times (0.3 - 0.2) \times 10^6}{4 \times 10^{-3} \times 0.1} \times 60 = 84.82(\text{cm}^3)$$

$$(2) v = \frac{Q}{A} = \frac{84.82/60}{\pi \cdot 6^2/4} = 5 \times 10^{-4}(\text{m/s})$$

$$Re = \frac{4\sqrt{2} \times 10^{-3} \rho v \sqrt{K}}{\phi^{3/2} \mu_o} = \frac{4\sqrt{2} \times 10^{-3} \times 800 \times 5 \times 10^{-4} \times \sqrt{2}}{0.2^{3/2} \times 4} = 0.009$$

$$(3) Re = \frac{4\sqrt{2} \times 10^{-3} \times 1000 \times 1.2 \times 10^{-5} \times \sqrt{2}}{0.2^{3/2} \times 162} = 6.8 \times 10^{-6}$$

1-2 设液体通过直径 $D=10\text{cm}$, 长 $L=30\text{cm}$ 的砂管, 已知 $\phi=0.2$, $\mu_o=0.65\text{mPa} \cdot \text{s}$, $\Delta p=0.7\text{MPa}$, $S_w=0.3$, $K_o=0.2\mu\text{m}^2$, 求产量 Q 、渗流速度 v 和平均真实渗流速度 v_t 。

解: 由达西定律知

$$\text{产量 } Q = \frac{AK\Delta p}{\mu L} = \frac{\pi \times 0.1^2}{4} \times \frac{0.2 \times 10^{-12} \times 0.7 \times 10^6}{0.65 \times 10^{-3} \times 0.3} = 5.6 \times 10^{-6}(\text{m}^3/\text{s}) = 5.6(\text{cm}^3/\text{s})$$

$$\text{渗流速度 } v = \frac{K\Delta p}{\mu L} = \frac{0.2 \times 10^{-12} \times 0.7 \times 10^6}{0.65 \times 10^{-3} \times 0.3} = 7.19 \times 10^{-4}(\text{m/s})$$

$$\text{真实渗流速度 } v_t = \frac{v}{\phi(1-S_{wc})} = \frac{7.19 \times 10^{-4}}{0.2 \times (1-0.3)} = 5.14 \times 10^{-3} (\text{m/s})$$

1-3 设砂层 $L=500\text{m}$, 宽 $B=100\text{m}$, 厚 $h=4\text{m}$, $K=0.3\mu\text{m}^2$, 孔隙度 $\phi=0.32$, $\mu_o=3.2\text{mPa}\cdot\text{s}$, $Q=15\text{m}^3/\text{d}$, $S_{wc}=0.17$ 。(1) 求压差 Δp , 渗流速度 v 和平均真实渗流速度 v_t 。(2) 若 $Q=30\text{m}^3/\text{d}$, 则 Δp 、 v 和 v_t 又为多少? (3) 求两种情况原油经过砂层所需的时间 T_1 和 T_2 等于多少?

解: (1) 由达西定律 $Q = \frac{AK\Delta p}{\mu L}$, 得

$$\Delta p = \frac{Q\mu L}{AK} = \frac{15}{24 \times 3600} \times \frac{3.2 \times 10^{-3} \times 500}{100 \times 4 \times 0.3 \times 10^{-12}} = 2.31 \times 10^6 (\text{Pa}) = 2.31 (\text{MPa})$$

$$\text{渗流速度 } v = \frac{Q}{A} = \frac{15}{24 \times 3600 \times 100 \times 4} = 4.34 \times 10^{-7} (\text{m/s})$$

$$\text{真实渗流速度 } v_t = \frac{v}{\phi(1-S_{wc})} = \frac{4.34 \times 10^{-7}}{0.32 \times (1-0.17)} = 1.63 \times 10^{-6} (\text{m/s})$$

(2) 同理, 若 $Q=30\text{m}^3/\text{d}$, 则 $\Delta p=4.62\text{MPa}$; $v=8.68 \times 10^{-7}\text{m/s}$; $v_t=3.26 \times 10^{-6}\text{m/s}$ 。

(3) 原油经过砂层所需时间

$$T_1 = \frac{AL\phi(1-S_{wc})}{Q} = \frac{500 \times 100 \times 4 \times 0.32 \times 0.17}{15} = 3541.3 (\text{d})$$

同理, $T_2=1770.7\text{d}$ 。

1-4 试推导总压缩系数 C_t 与油、气、水的压缩系数及其饱和度的关系式。

解: 由于岩石的总压缩系数表示地层压力下降一个单位从单位孔隙体积中依靠油水的膨胀以及孔隙体积的减小所驱出的流体总量, 因此有总压缩系数为

$$\begin{aligned} C_t &= \frac{1}{V_p} \left(\frac{\Delta V_p - \Delta V_o - \Delta V_w - \Delta V_g}{\Delta p} \right) \\ &= \frac{1}{V_p} \cdot \frac{\Delta V_p}{\Delta p} - \frac{1}{V_p} \cdot \frac{\Delta V_o}{\Delta p} - \frac{1}{V_p} \cdot \frac{\Delta V_w}{\Delta p} - \frac{1}{V_p} \cdot \frac{\Delta V_g}{\Delta p} \\ &= C_f - \frac{V_o}{V_p} \cdot \frac{1}{V_o} \cdot \frac{\Delta V_o}{\Delta p} - \frac{V_w}{V_p} \cdot \frac{1}{V_w} \cdot \frac{\Delta V_w}{\Delta p} - \frac{V_g}{V_p} \cdot \frac{1}{V_g} \cdot \frac{\Delta V_g}{\Delta p} \\ &= C_f + S_o C_o + S_w C_w + S_g C_g \end{aligned}$$

第二章 单相不可压缩液体的稳定渗流

一、学习引导

1. 不可压缩流体

不可压缩流体是指随着压力的变化而体积不发生变化的流体，又称为刚性流体。

2. 可压缩流体

可压缩流体是指随着压力的变化，体积发生弹性膨胀或收缩的流体。

3. 稳定渗流

稳定渗流是指流体在多孔介质中渗流时，压力、渗流速度、密度等运动参数不随时间的变化而变化，因此又称为定常渗流或稳态渗流。一般只有在单相流体渗流时，才会发生稳定渗流。

4. 不稳定渗流

不稳定渗流是指流体在多孔介质中渗流时，压力、渗流流速等运动参数不仅与空间有关，而且随时间的变化而变化，因此又称非定常渗流或非稳态渗流。

5. 线性渗流与非线性渗流

线性渗流是指流体的渗流速度与压力梯度成线性关系的渗流形式，也称为达西渗流。非线性渗流是指渗流速度与压力梯度之间不成线性关系的渗流形式，也称为非达西渗流。

6. 单相渗流

单相渗流是指在多孔介质中只有单相流体流动的渗流形式，如在地层压力高于饱和压力条件下，油藏中的原油流动；又如气藏中气体的流动等。

7. 两相渗流与多相渗流

两相渗流是指在多孔介质中有两种非混相流体同时参与流动的渗流形式，如水驱油过程中的油、水两相渗流。同时有两种以上互不混相的流体参与流动的渗流叫多相渗流，如地层中油、气、水三相流动。

8. 多组分渗流

多组分渗流是指有多种组分的烃质或非烃质混合的流体在多孔介质中的渗流。

9. 渗流的三种基本方式

渗流包括平面一维流动（平面线性流）、平面径向流、球面径向流三种基本方式。

10. 渗流场图

渗流场图是指由一组等压线和一组流线按一定规则构成的图形。等压线是指流场中压力相同点的轨迹，与等压线正交的线为流线。一定规则意为相邻两条等压线的压差相等，相邻两条流线间的流量相等。

11. 球面径向流

球面径向流是指对块状底水油藏的厚油（气）层，油井仅钻开油层顶部，流线呈径向向井点汇集，其渗流面积呈半球形的渗流形式，简称球面流。

12. 供给边缘

若油藏外围有广大含水区为油藏供水，使压力保持不变，这个能量供给前缘称为油藏的供给边缘。在油田开采过程中，许多井同时生产，每一口油井的周围都自然地划分出不同的供油面积，其边缘称为油井的供给边缘。

13. 表皮效应

表皮效应是指由于钻井、井下作业和增产措施，使井底附近地层渗透率变差或变好，从而引起附加流动阻力的效应。

14. 表皮系数

表皮系数又称为井底阻力系数，是表示井的完善程度以及表皮效应的一个量，无量纲。

15. 不完善井

由于技术上的原因，在实际工作中，井不能全部钻穿油层，或者虽钻穿了全部油层，但又经过固井后用射孔方法完井，改变了井底结构。此外，由于钻进过程中的钻井液堵塞或者在油井生产过程中采取了增产措施，使井底附近的局部范围内的油层性质发生变化。这些井底结构和井底附近地区油层性质发生变化的井称为渗流不完善井，简称为不完善井。

按照油井的井底结构不同，可以将不完善井分为打开程度不完善、打开性质不完善、双重不完善。

16. 打开程度不完善井

打开程度不完善井是指油井没有钻穿整个油层的厚度，而且钻开部分的井壁是全部裸露的油井。

17. 打开性质不完善井

打开性质不完善井是指是指油层全部钻穿，但采用射孔方式完井，这时地层内的流体只能通过所射的孔眼流入井筒的油井。

18. 双重不完善井

双重不完善井是指既没有全部钻开油层，而且所钻开的油层又是通过射孔完井的油井。

19. 井壁附加阻力 Δp_s

井壁附加阻力是指由于井底损害等原因引起的发生在井壁处的压降，也叫井壁附加压降。

$$\Delta p_s = \frac{Q\mu}{2\pi Kh} S$$

式中 S ——表皮系数，无量纲。

20. 不完善系数 η

不完善系数是指在相同的压差下，不完善井的产量与完善井的产量之比，即

$$\eta = \frac{\ln \frac{r_e}{r_w}}{\ln \frac{r_e}{r_w} + S}$$

式中 r_e ——供给半径, m;
 r_w ——油井完井半径, m。

21. 井的有效半径

井的有效半径也叫做井的折算半径, 是指将不完善井当作完善井来处理时这口完善井的半径, 用 r_{we} 表示, 其计算公式为

$$r_{we} = r_w e^{-S}$$

式中 r_{we} ——油井有效半径, m。

22. 试井

试井是指直接从实测的产量、压力数据反求地层参数, 然后用求得的地层参数来预测新的工作制度下的产量和压力。试井分为稳定试井和不稳定试井。

试井的特点: 不受开发时间限制; 费用比取心少; 数据来源于实际, 应用于实际。

23. 稳定试井

稳定试井也叫系统试井, 是指逐步改变井的工作制度 (对自喷井是改变油嘴直径; 对气举井是改变注气量; 对抽油井是改变冲程和冲数等), 测量每一个工作制度下稳定的井底压力及产液 (油) 量、产气量、含水率、含砂量, 以求油藏参数或选择油井工作制度。

24. 指示曲线

指示曲线是指根据稳定试井测得的油井、气井、水井的产量或注入量和生产压差关系绘制的曲线, 如图 2-1 所示。指示曲线为直线时 (曲线 1), 说明流体在地层中的流动符合达西渗流定律; 当压差增大时, 直线末端向下弯曲 (曲线 2), 产生非达西渗流。曲线 3 是一种不正常现象, 一般说明生产不稳定或是多层产油, 或是测试仪表有问题。

25. 吸水指示曲线

吸水指示曲线是指注水压力与注水量的关系曲线, 测试时, 注水压力应缓慢上升, 每个测试点的注水压力和注水量必须稳定, 测试点不应少于 4 个, 如图 2-2 所示。

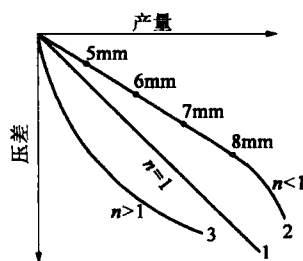


图 2-1 指示曲线

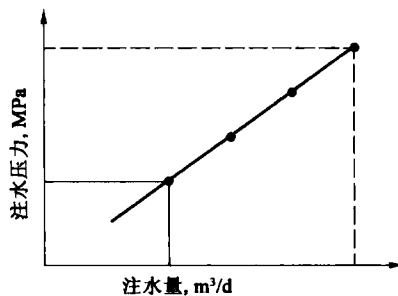


图 2-2 吸水指示曲线

26. 采油指数 J

采油指数是指单位生产压差下油井的日产量, 单位为 $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{Pa})$ 。它代表油井生产能力的大小, 可以用来判断油井工作状况及评价增产措施的效果。在油层内呈单相 (无游离

气) 流动状态下, 不同工作制度的采油指数基本相同, 用公式表示为

$$J = \frac{2\pi Kh}{\mu \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)}$$

27. 采液指数

采液指数是指单位采油压差下油井的日产液量。它代表油井见水后生产能力的大小, 并可以用来判断油井的工作状况。

28. 吸水指数

吸水指数是指注水井在单位注水压差下的日注水量。它反映注水井注水能力及油层吸水能力的大小, 并可用来分析注水井工作状况及油层吸水能力。

29. 采油强度

采油强度是指单位有效厚度油层的日产油量。它是衡量油层生产能力的一个指标, 可用来分析各类油层动用状况。

30. 采液强度

采液强度是指单位有效厚度油层的日产液量, 单位为 $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$ 。它是油井见水后衡量油层吸水状况的一个指标。合理的注水强度对充分发挥各类油层的作用、提高油田开发效果有着重要意义。

31. 导压系数

导压系数是指压缩液体在弹性多孔介质中发生不稳定渗流时, 表示压力传导快慢的一个参数, 定义为

$$\eta = \frac{K}{\mu \phi C_t}$$

式中 η ——导压系数, m^2/s ;

C_t ——总压缩系数, Pa^{-1} 。

32. 点源与点汇

点源是指在渗流场中, 向四周发射流线的点; 点汇是指在渗流场中, 从四周汇集流线的点。

33. 压降漏斗

在平面径向流时, 由于井的投产造成地层压力下降, 从井壁到供给边缘, 压力下降幅度逐渐减小, 其压力面为漏斗状的曲面, 成为压降漏斗。

二、难点分析

1. 单相不可压缩液体作平面一维渗流

(1) 流量公式:

$$Q = \frac{KA(p_e - p_w)}{\mu L}$$

(2) 压力分布公式:

$$p(x) = \begin{cases} p_e - \frac{p_e - p_w}{L}x \\ p_w + \frac{p_e - p_w}{L}(L - x) \end{cases}$$

(3) 渗流速度:

$$v = \frac{K(p_e - p_w)}{\mu L}$$

(4) 渗流场图如图 2-3 所示。

2. 单相不可压缩液体作平面径向流

(1) 流量公式:

$$Q = \frac{2\pi Kh(p_e - p_w)}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}}$$

(2) 压力分布公式:

$$p(r) = \begin{cases} p_e - \frac{p_e - p_w}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \ln \frac{r_e}{r} \\ p_w + \frac{p_e - p_w}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \ln \frac{r}{r_w} \end{cases}$$

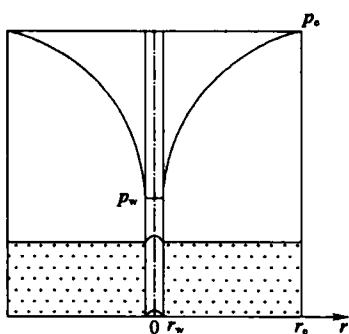


图 2-4 平面径向流的压力分布

压力分布是对数曲线绕井轴的旋转面，通常称为压降漏斗。根据这一公式可知，压力 p 和距离 r 的对数成线性关系，即距离成几何级数变化，压差成算术级数变化，如图 2-4 所示。

将上式两边对距离求导，得

$$\frac{dp}{dr} = \frac{p_e - p_w}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \cdot \frac{1}{r}$$

易知：压力梯度与距离成反比，即越接近井底，压力损失越大。

(3) 渗流速度:

$$v = - \frac{K(p_e - p_w)}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}} \frac{1}{r}$$

上式说明，距井越近，渗流速度越大。

(4) 渗流场图如图 2-5 所示。

(5) 平均地层压力。由于供给边界压力很难确定，所以通常用平均地层压力来代替边界压力，即

$$\bar{p} = \frac{1}{V} \iiint_V p(r) dV \approx p_e - \frac{p_e - p_w}{2 \ln \frac{r_e}{r_w}}$$

(6) 油井产量公式。用平均地层压力代替供给压力即得油井产量公式

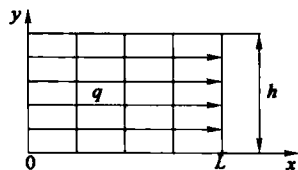


图 2-3 平面一维径向流渗流场图

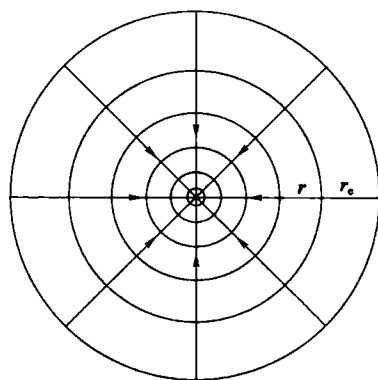


图 2-5 平面径向流渗流场图