

国外油气勘探开发新进展丛书

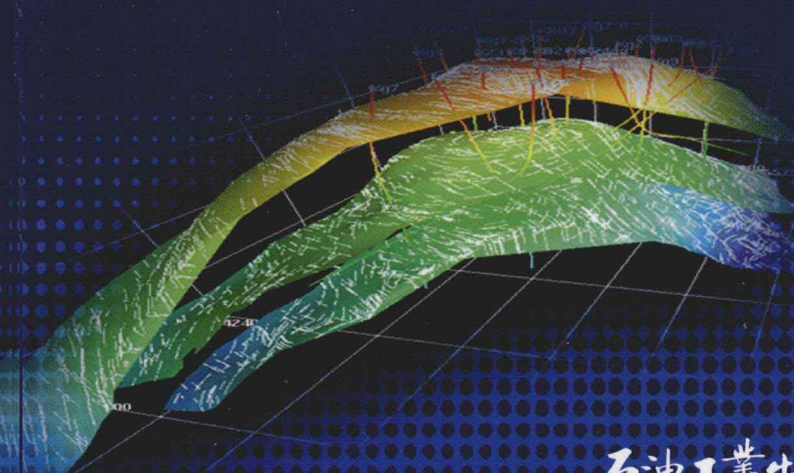
GUOWAIYOUQIKANTANKAIFAXINJINZHANCONGSHU



现代油藏工程

ADVANCED RESERVOIR ENGINEERING

[美] 塔雷克·艾哈迈德 保罗·麦金尼 著
董旭 董玉红 郭昊 徐光焰 付良壁 等译



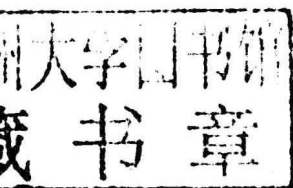
石油工业出版社

国外油气勘探开发新进展丛书 (九)

现代油藏工程

[美]塔雷克·艾哈迈德 保罗·麦金尼 著

董 旭 董玉红 郭 昊 徐光焰 付良璧 等译



石油工业出版社

内 容 提 要

本书内容涵盖了油藏工程的基本理论和常用的分析方法,包括试井解释、水侵、非常规气藏、油藏动态、油藏动态预测和油田经济学等内容。

本书适合从事油气藏开发的科研人员、技术人员、管理人员和高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代油藏工程/[美]艾哈迈德等著;董旭等译.

北京:石油工业出版社,2012.3

(国外油气勘探开发新进展丛书.第9辑)

书名原文:Advanced Reservoir Engineering

ISBN 978-7-5021-8782-8

I. 现…

II. ①艾…②董…

III. 油藏工程

IV. TE34

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第228536号

All right reserved.No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, eletronic or mechanical, including photocopy,recording, or any information storage and retrieval system,without the prior written permission of the publisher.

本书经 Elseriver INC 授权翻译出版,中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。著作权合同登记号图字:01-2005-5515

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) 64523562 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

2012年3月第1版 2012年3月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:43.5

字数:1053千字

定价:180.00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

《国外油气勘探开发新进展丛书（九）》

编 委 会

主 任：赵政璋

副 主 任：赵文智 张卫国

编 委：（按姓氏笔画排序）

马 纪 刘德来 杨 虎 张 磊

张仲宏 周思柱 周家尧 侯玉芳

姬忠礼 章卫兵 詹盛云

序

为了及时学习国外油气勘探开发新理论、新技术和新工艺，推动中国石油上游业务技术进步，本着先进、实用、有效的原则，中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织多方力量，对国外著名出版社和知名学者最新出版的、代表最先进理论和技术水平的著作进行了引进，并翻译和出版。

从2001年起，在跟踪国外油气勘探、开发最新理论新技术发展和最新出版动态基础上，从生产需求出发，通过优中选优已经翻译出版了8辑近50本专著。在这套系列丛书中，有些代表了某一专业的最先进理论和技术水平，有些非常具有实用性，也是生产中所亟需。这些译著发行后，得到了企业和科研院校广大生产管理、科技人员的欢迎，并在实用中发挥了重要作用，达到了促进生产、更新知识、提高业务水平的目的。部分石油单位统一购买并配发到了相关的技术人员手中。同时中国石油总部也筛选了部分适合基层员工学习参考的图书，列入“千万图书送基层，百万员工品书香”活动的书目，配发到中国石油所属的4万个基层队站。该套系列丛书也获得了我国出版界的认可，三次获得了中国出版工作者协会的“引进版科技类优秀图书奖”，形成了规模品牌，产生了很好的社会效益。

2011年在前8辑出版的基础上，经过多次调研、筛选，又推选出了国外最新出版的6本专著，即《油藏工程手册》、《现代油藏工程》、《钻井工程手册》、《空气与气体钻井手册（第三版）》、《燃气轮机工程手册》、《阀门选用手册（第五版）》，以飨读者。

在本套丛书的引进、翻译和出版过程中，中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织了一批著名专家、教授和有丰富实践经验的工程技术人员担任翻译和审校人员，使得该套丛书能以较高的质量和效率翻译出版，并和广大读者见面。

希望该套丛书在相关企业、科研单位、院校的生产和科研中发挥应有的作用。

中国石油天然气股份有限公司副总裁



前 言

《现代油藏工程》一书由阿纳达科石油公司高级责任顾问塔雷克·艾哈迈德和阿纳达科加拿大分公司油藏工程副总裁保罗·麦金尼编著，内容涵盖了油藏工程的基本理论和常用的分析方法，包括试井解释、水侵、非常规气藏、油藏动态、油藏动态预测和油田经济学简介，共六章。

翻译本书的目的是寻找更多的机会了解国际同行业的专业理论与技术进步，为国内工程师、现场操作人员以及在校学生提供查询、借鉴和学习的资料。

本书的第1章由大庆油田有限责任公司第二采油厂侯玉芳、付良壁译；第2章由澳大利亚南奥大学郭昊译；第3章由东北石油大学董旭译；第4、5章由东北石油大学董玉红译，第6章由大庆油田有限责任公司第二采油厂徐光焰译；同时第二采油厂李万荣，第四采油厂李净然等同志参加了本书部分章节的翻译。全书由侯玉芳、董旭审校。

另外，在本书翻译过程中得到了东北石油大学夏惠芬教授、大庆油田有限责任公司第三采油厂高级工程师王俊亮的指导和帮助，在此表示诚挚的感谢。

由于翻译人员的专业知识与现场经验的限制，书中难免存在不足和不当之处，欢迎广大专家、读者批评指正。

译 者

2010年9月

原 书 前 言

本书的主要目的是借助于最简单最直接的数学方法，介绍油藏工程的基本理论。工程师们只有全面了解油藏工程理论，才能以实用的方式解决复杂的油藏问题。本书编排的内容适合作为高等院校的教材和现场工程师的参考书。

第1章描述了测井理论及实际应用、压力分析技术，这是油藏工程中最重要科目。第2章讨论了各种水侵模型，详细论述了应用这些模型的计算过程。第3章介绍了非常规气藏的数学计算方法，非常规气藏包括异常压力气藏、煤层甲烷、致密气藏、气体水化物以及浅层气藏。第4章论述了油藏开发的基本原理和物质平衡方程的各种形式。第5章重点说明了应用物质平衡方法预测不同驱动机理下的油藏动态。第6章介绍了油田经济学的基础知识。

塔雷克·艾哈迈德 保罗·麦金尼

目 录

1 试井解释

1.1 油藏基本特性	(1)
1.2 流体流动方程	(6)
1.3 不稳定试井	(86)
1.4 典型曲线	(125)
1.5 压力导数法	(142)
1.6 干扰试井和脉冲试井	(209)
1.7 注水井测试	(235)

2 水侵

2.1 水侵分类	(255)
2.2 天然水侵的识别	(257)
2.3 水侵模型	(258)

3 非常规气藏

3.1 垂直气井动态	(314)
3.2 水平气井动态	(339)
3.3 常规气藏和非常规气藏的物质平衡方程	(341)
3.4 煤层甲烷 (CBM)	(372)
3.5 致密气藏	(400)
3.6 天然气水化物	(470)
3.7 浅层气藏	(487)

4 油藏动态

4.1 一次采油机理	(495)
4.2 物质平衡方程	(503)
4.3 通用的 MBE	(504)
4.4 直线型物质平衡方程	(519)
4.5 MBE 的 Tracy 形式	(548)

5 油藏动态预测

5.1 阶段 1：油藏动态预测方法	(554)
5.2 阶段 2：油井动态	(584)
5.3 阶段 3：把油藏动态和时间联系起来	(622)

6 油田经济学简介

6.1 经济等值理论和评价方法	(627)
6.2 储量定义和分类	(640)
6.3 会计原则	(643)

附录	(648)
----------	-------

参考文献	(674)
------------	-------

1 试井解释

1.1 油藏基本特性

孔隙介质中的流动是非常复杂的现象，不像管线中的流动那样可以详细描述。对于管线流动，可以很容易地测量管线的长度和直径，并计算不同压力下的产能系数。而孔隙介质中的流动则不同，它因没有清晰的流道，而不能进行测量。

多年来，孔隙介质中的流体流动分析围绕以下两方面展开：试验研究和理论分析。物理学家、工程师、水力学家等通过试验测量了各种流体在不同孔隙介质（从填砂模型到熔融硬质玻璃）中流动的动态。基于分析，他们尝试建立流动定律和关系式，这些关系式能够对相似的系统进行分析预测。

本章的主要目的是介绍描述油藏流体动态的数学关系式。这些关系式的数学形式很大程度取决于油藏的特点。必须考虑的油藏基本特点包括：油藏流体的类型；流动形态；油藏几何形态；油藏中流动流体的数量。

1.1.1 流体类型

等温压缩系数是在确定油藏流体的类型时必须考虑的控制因素。一般情况下，油藏流体分为三种类型：(1) 不可压缩流体；(2) 微可压缩流体；(3) 可压缩流体。

等温压缩系数 c 用以下两个等价表达式描述。

用流体体积表示：

$$c = \frac{-1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \quad (1.1)$$

用流体密度表示：

$$c = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (1.2)$$

式中 V ——流体体积；

ρ ——流体密度；

p ——压力，psi；

c ——等温压缩系数， psi^{-1} 。

1.1.1.1 不可压缩流体

体积或密度不随压力的变化而变化的流体定义为不可压缩流体。即：

$$\frac{\partial V}{\partial p} = 0 \quad \text{和} \quad \frac{\partial \rho}{\partial p} = 0$$

不可压缩流体是不存在的；然而，在某些情况下为了简化推导过程和许多流动方程的最终形式，会做这种假设。

1.1.1.2 微可压缩流体

微可压缩流体的体积或密度随压力的变化只发生微小变化。假设某一微可压缩流体在初始压力 p_{ref} 下的体积为 V_{ref} ，流体体积的变化与压力 p 的数学关系式可通过对方程 (1.1) 积分得到：

$$\begin{aligned} -c \int_{p_{\text{ref}}}^p dp &= \int_{V_{\text{ref}}}^V \frac{dV}{V} \\ \exp[c(p_{\text{ref}} - p)] &= \frac{V}{V_{\text{ref}}} \\ V &= V_{\text{ref}} \exp[c(p_{\text{ref}} - p)] \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中 p ——压力，psia；

V ——压力 p 对应的体积，ft³；

p_{ref} ——初始压力，psia；

V_{ref} ——初始压力下的流体体积，ft³。

指数 e^x 可以展开为：

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \cdots + \frac{x^n}{n!} \quad (1.4)$$

因为指数 x [它代表 $c(p_{\text{ref}} - p)$] 非常小，通过截取方程 (1.4)， e^x 可近似地表示为：

$$e^x = 1 + x \quad (1.5)$$

联合方程 (1.5) 和方程 (1.3) 得：

$$V = V_{\text{ref}} [1 + c(p_{\text{ref}} - p)] \quad (1.6)$$

对方程 (1.2) 进行同样的推导得：

$$\rho = \rho_{\text{ref}} [1 - c(p_{\text{ref}} - p)] \quad (1.7)$$

式中 V ——压力 p 下的体积；

ρ ——压力 p 下的密度；

V_{ref} ——初始压力 p_{ref} 下的体积；

ρ_{ref} ——初始压力 p_{ref} 下的密度。

应该指出的是原油和水属于微可压缩流体。

1.1.1.3 可压缩流体

这种流体的体积随着压力的变化而发生很大的变化。所有气体均可看做可压缩流体。方程 (1.5) 所表示的级数展开式的截取式对可压缩流体不适用，应该用方程 (1.4) 所表示的完全展开式。

任一可压缩流体的等温压缩系数可表示为：

$$c_g = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \right)_T \quad (1.8)$$

图 1.1 和图 1.2 说明了三种类型流体的体积和密度随压力的变化情况。

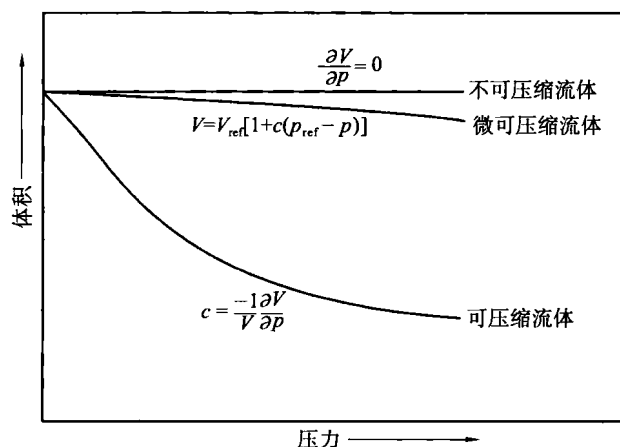


图 1.1 压力—体积关系

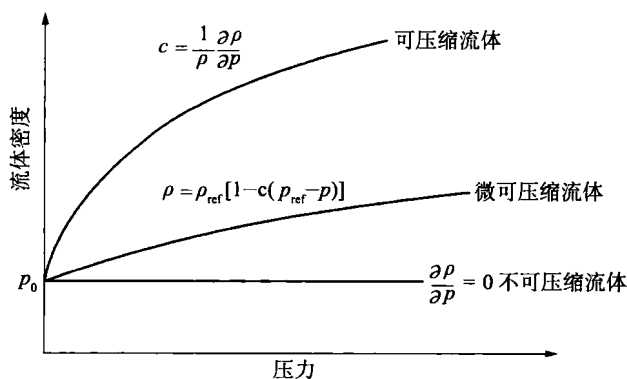


图 1.2 不同类型流体密度随压力的变化

1.1.2 流动形态

为了描述流体流动动态及油藏压力分布与时间的函数关系，必须识别三种基本流动形态，即：稳定流、不稳定流、拟稳定流。

1.1.2.1 稳定流

油藏中任一位置的压力保持恒定，也就是压力不随时间变化而变化的流动形态称为稳定流。这种情况的数学表达式是：

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_i = 0 \quad (1.9)$$

该方程表示任一位置 i 的压力随时间的变化率为零。在油藏中, 只有当油藏被高压含水层充分补给或恒压开采时, 才会出现稳定流情况。

1.1.2.2 不稳定流

油藏中任一位置的压力随时间的变化率不为零或恒定的流动形态称为不稳定流 (通常称为瞬变流)。这一定义表明压力对时间的导数是位置 i 和时间 t 的函数, 因此:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right) = f(i, t) \quad (1.10)$$

1.1.2.3 拟稳定流

当油藏中不同位置的压力随时间呈线性递减, 即压力递减速率恒定, 这种流动形态定义为拟稳定流。这个定义用数学表达式可表示为任一位置的压力随时间的变化率为常数, 即:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_i = \text{常数} \quad (1.11)$$

应该指出的是拟稳定流通常也被称为半稳定流或准稳定流。

图 1.3 显示了三种流动形态的压力递减与时间的函数关系的对比。

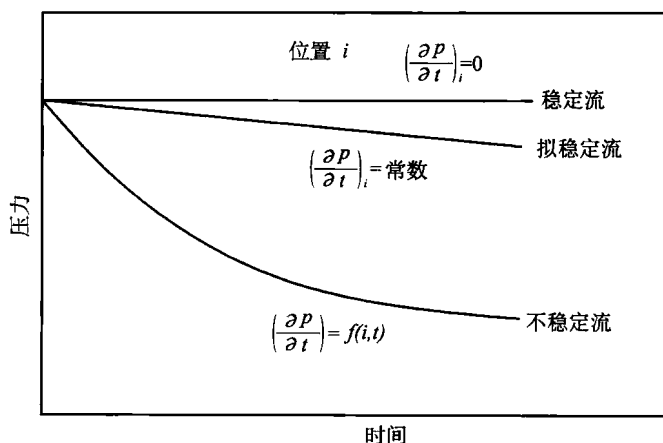


图 1.3 流动形态

1.1.3 油藏几何形态

油藏的 shape 对它的流动动态有很大的影响。多数油藏的边界不规则, 只有使用数值模拟程序才有可能对它的几何形态进行精确的数学描述。然而, 为了一些工程目的, 实际流动的几何形态可以用下列流动的几何形态之一代替。

- (1) 径向流。
- (2) 单向线性流。
- (3) 球形流和半球形流。

1.1.3.1 径向流

当油藏不存在严重的非均质性的情况时，在离井眼一定距离的位置，流体沿着径向流线流向或流出井。因为流体是从各个方向流向井并在井眼处汇集，术语“径向流”通常用于表示流向井的流动。图 1.4 显示了径向流体系的理想流线和等压线。

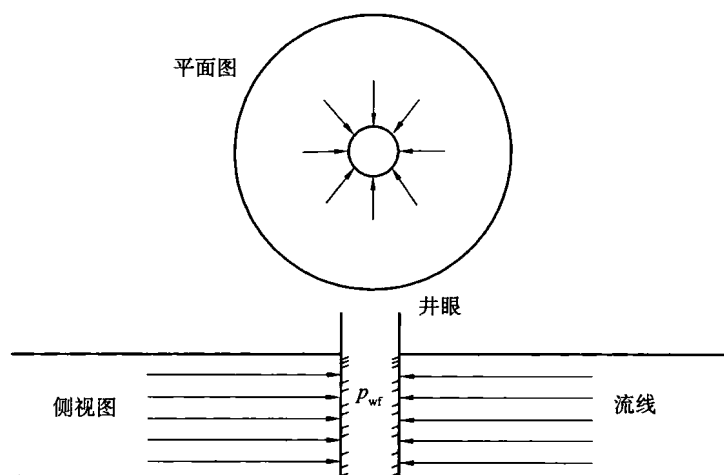


图 1.4 理想向井径向流

1.1.3.2 单向线性流

流线平行且单方向的流动称为单向线性流。另外，流体流经的横截面积必须恒定。理想的单向线性流体系如图 1.5 所示。单向线性流方程常见的应用是流体流入垂直水力裂缝，如图 1.6 所示。

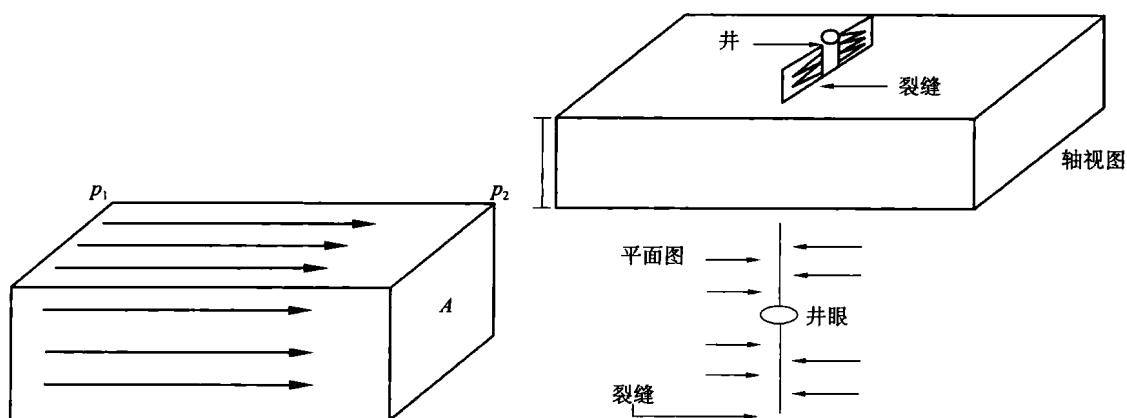


图 1.5 单向线性流

图 1.6 流入垂直裂缝的理想单向线性流

1.1.3.3 球形流和半球形流

由于完井方式的不同，在井底附近可能出现球形流或半球形流。有限射孔层段的井在孔眼附近就会出现球形流，如图 1.7 所示。只局部射开油层的井，如图 1.8 所示，会出现半球形流。当底水锥进占主导时会出现这种情况。

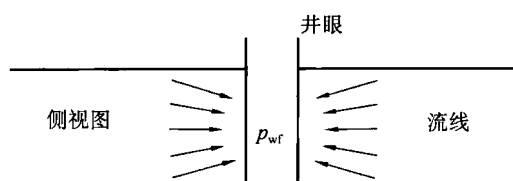


图 1.7 入口受限的球形流

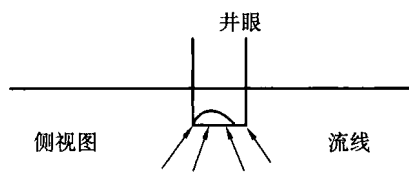


图 1.8 局部射孔井的半球形流

1.1.4 油藏中流动流体的数量

预测油藏流体体积性能以及压力动态的数学表达式的形式和复杂性取决于油藏中可流动流体的数量。一般有三种流动体系：(1) 单相流（油、水或气）；(2) 两相流（油水、油气或气水）；(3) 三相流（油、水和气）。

随着流动流体数量的增加，液体流动的描述以及后续的压力数据的分析会变得更加困难。

1.2 流体流动方程

描述油藏内的流动动态的流体流动方程可以有多种形式，主要取决于前面介绍的变量的不同组合（即流动类型、流体类型等）。综合考虑质量守恒方程、运动方程（达西方程）以及各种状态方程，可以得到所需的流动方程。因为所有的流动方程都是以达西定律为基础，因此先介绍这一运动关系式是很重要的。

1.2.1 达西定律

达西定律是孔隙介质中流体运动的基本定律。达西在 1956 年建立的数学表达式表明孔隙介质中均质流体的速度与压力梯度成正比，与流体黏度成反比。对于水平线性流动体系，关系式是：

$$v = \frac{q}{A} = -\frac{K}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1.12a)$$

式中 v ——视速度，cm/s；

q ——体积流量，cm³/s；

A ——岩石的总横截面积，包括岩石的面积和孔道的面积，cm²；

μ ——流体的黏度，mPa·s；

dp/dx ——压力梯度，方向与速度 v 和体积流量 q 相同，atm/cm；

K ——岩石的渗透率，D。

方程 (1.12a) 的负号表示压力梯度 dp/dx 的方向与流动方向相反。如图 1.9 所示。

对于水平径向流体系，压力梯度为正（图 1.10），达西方程可以表示为下列通用的径向流方程形式：

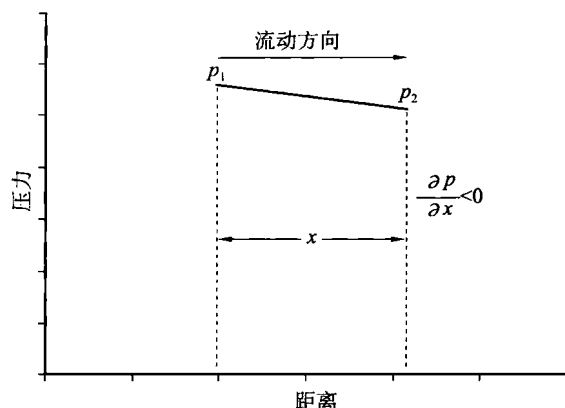


图 1.9 单向线性流压力与距离的关系

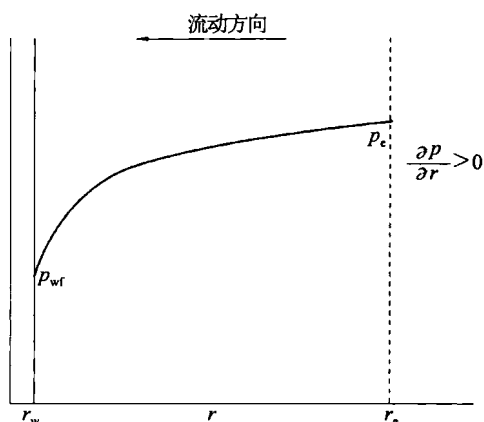


图 1.10 径向流的压力梯度

$$v = \frac{q_r}{A_r} = \frac{K}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_r \quad (1.12b)$$

式中 q_r ——半径 r 处的体积流量；
 A_r ——半径 r 处流经的横截面积；
 $(\partial p / \partial r)_r$ ——半径 r 处的压力梯度；
 v ——半径 r 处的视速度。

半径 r 处的横截面积是圆柱的表面积。对于有效厚度为 h 且全部射孔的井，横截面积 A 可以表示为：

$$A_r = 2 \pi r h$$

应用达西定律必须满足下列条件：

- (1) 层流（黏性流）；
- (2) 稳定流；
- (3) 不可压缩流体；
- (4) 均质地层。

流速过高会出现紊流，此时压力梯度的增加速度大于流速的增加速度，达西方程需要修正。如果紊流存在，应用达西方程会导致严重错误。本章后面的内容将介绍紊流时达西方程的修正。

1.2.2 稳定流

根据稳定流的定义，只有当整个油藏的压力不随时间变化时才具备稳定流的条件。下面列出了可以应用稳定流进行动态描述的几种不同几何形态的油藏的流体类型。

- (1) 不可压缩流体单向线性流。
- (2) 微可压缩流体单向线性流。
- (3) 可压缩流体（气体）单向线性流。

- (4) 不可压缩流体径向流。
- (5) 微可压缩流体径向流。
- (6) 可压缩流体径向流。
- (7) 水平多相流。

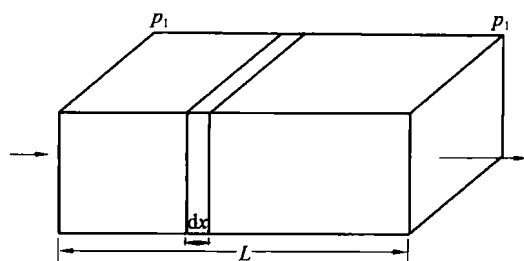


图 1.11 单向线性流模型

1.2.2.1 不可压缩流体单向线性流

在某一单向线性流系统，假设系统的入口和出口端完全开放，流体流经的横截面积 A 恒定。且假设单向线性流系统的两侧、上面和下面没有流动通过，如图 1.11 所示。某一不可压缩流体流过单元 dx ，各点的速度 v 和流量 q 恒定。该系统的流动动态可以用达西方程的微分形式表示，即方程 (1.12a)。对方程 (1.12a) 分离变量，并在单向线性流系统的长度范围内

积分：

$$\frac{q}{A} \int_0^L dx = -\frac{K}{\mu} \int_{p_1}^{p_2} dp$$

得到：

$$q = \frac{KA(p_1 - p_2)}{\mu L}$$

用现场常用单位表示上述关系式：

$$q = \frac{0.001127KA(p_1 - p_2)}{\mu L} \quad (1.13)$$

式中 q ——流量，bbl/d；
 K ——绝对渗透率，mD；
 P ——压力，psia；
 μ ——黏度，mPa·s；
 L ——长度，ft；
 A ——横截面积，ft²

例 1.1 某一不可压缩流体在线性孔隙介质中流动，性能参数如下：

$L=2000\text{ft}$ ， $h=20\text{ft}$ ， $\text{width}=300\text{ft}$ ， $K=100\text{mD}$ ， $\phi=15\%$ ， $\mu=2\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ， $p_1=2000\text{psi}$ ， $p_2=1990\text{psi}$ 。

求：(1) 流量，bbl/d；(2) 流体视速度，ft/d；(3) 流体的实际速度，ft/d。

解 计算横截面积 A ：

$$A = (h)(\text{width}) = 20 \times 300 = 6000\text{ft}^2$$

(1) 根据方程 (1.13) 计算流量：

$$\begin{aligned} q &= \frac{0.001127KA(p_1 - p_2)}{\mu L} \\ &= \frac{0.001127 \times 100 \times 6000 \times (2000 - 1990)}{2 \times 2000} \\ &= 1.6905 \text{ bbl/d} \end{aligned}$$

(2) 计算视速度：

$$v = \frac{q}{A} = \frac{1.6905 \times 5.615}{6000} = 0.0016 \text{ ft/d}$$

(3) 计算实际速度：

$$v = \frac{q}{\phi A} = \frac{1.6905 \times 5.615}{0.15 \times 6000} = 0.0105 \text{ ft/d}$$

在倾斜油层，方程 (1.13) 中的压力差 ($p_1 - p_2$) 不是唯一的驱动力。在确定流动方向和流量时，重力是另一个必须考虑的重要的驱动力。流体重力通常垂直向下，而压力降产生的力可能在任一方向。使流体流动的力是这两个力的矢量和。实际应用中，为了得到矢量和，我们引进一个新的参数“流体势能”，它和压力有相同的量纲，即 psi，用符号 ϕ 表示。油藏中任一点的流体势能等于该点处的压力减去该点相对于任一指定的基准面的流体压头产生的压力。用 ΔZ_i 表示油藏中任一位置 i 到指定基准面的垂直距离，则：

$$\phi_i = p_i - \left(\frac{\rho}{144} \right) \Delta Z_i \quad (1.14)$$

式中 ρ ——密度，lb/ft³。

在方程 (1.14) 中流体密度用 g/cm³ 表示，则得到：

$$\phi_i = p_i - 0.433 \gamma \Delta Z \quad (1.15)$$

式中 ϕ_i —— i 点处的流体势能，psi；

p_i —— i 点处的压力，psi；

ΔZ_i —— i 点到指定基准面的垂直距离，ft；

ρ ——油藏条件下的流体密度，lb/ft³；

γ ——油藏条件下的流体密度，g/cm³，它不是流体的相对密度。

基准面通常选在油气界面、油水界面或地层的最高点。应用方程 (1.14) 或方程 (1.15) 计算位置 i 处的流体势能 ϕ_i ，当 i 点在基准面以下时垂直距离 Z_i 取正号，而当 i 点在基准面以上时垂直距离 Z_i 取负号。

如果 i 点在基准面以上：

$$\phi_i = p_i + \left(\frac{\rho}{144} \right) \Delta Z_i$$