

实用试井分析方法

实用试井分析方法

林加恩 编著

石油

学(北京)

353

20

石油工业出版社

新疆石油管理局科技专著

登录号	127071
分类号	TP353
种次号	020

实用试井分析方法

林加恩 编著



石油0121011

石油工业出版社

内 容 提 要

本书比较系统地总结了已有的试井分析理论和方法,并着重介绍近 15 年来国内外试井分析方面的最新发展。在内容选取上充分考虑了其矿场上的实用性和可操作性,并力求简明易懂。

本书可供从事试油、采油工程、油藏工程和钻井工程方面的专业人员以及大专院校有关专业的师生使用。

DP40/17

图书在版编目(CIP)数据

实用试井分析方法/林加恩编著.

北京:石油工业出版社,1996.5

ISBN 7-5021-1691-5

I. 实…

II. 林…

III. 试井-分析方法

IV. TE353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 03021 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

石油物探局制图印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开 15 印张 360 千字 印 1-3000

1996 年 5 月北京第 1 版 1996 年 5 月河北第 1 次印刷

ISBN7-5021-1691-5/TE. 1443

定价:30.00 元

前 言

试井技术是进行油、气、水等流体矿藏描述、评价及其生产动态监测的重要手段。试井分析技术经历了 60 多年的发展,已从简单的地层压力推算发展到能够比较全面地认识油、气藏内部岩石与流体的特性、储层产能和井筒状况,试井服务的范围跨越了油气田勘探和开发的全过程。通过试井可以促进对油气藏不断深入地认识从而达到改善油气田开发效果、降低生产成本和提高经济效益的目的。与岩心分析和测井解释结果相比,试井得到的有关地层参数代表更大范围内的平均值,它实施简单,成本低廉,在整个开发过程中随时都可进行。

尽管试井在油气田开发中有着如此重要的作用,但是它在我国各油气田开发中的实际应用效果一直不太理想,与测井资料相比试井资料的利用率较低,其中一个很重要原因是试井分析技术落后,在许多情况下不能有效地从试井资料中获取有用的信息。近年来,在试井分析技术方面取得的进展已足以改变这种状况。

近 16 年来,试井分析技术有着惊人的发展,并取得了一系列的重要成果。这些成果不仅有助于增进我们的试井分析水平,而且能够从试井资料中提取到更多更有用的信息。遗憾的是,比较全面、系统地反映这些最新发展成就的图书很少。目前有关试井分析理论与方法的素材大都分散在国内外繁多的石油及其相关文献资料之中,文献中发表的研究报告及论文一般只是对某一单独问题的有限论述。本书试图将已发表的资料与本人对试井分析理论的看法综合起来,向读者比较系统和全面地阐述试井分析的基本理论和方法。

本书在内容的选取上充分考虑了它的实用性和系统性,力求简明易懂地反映试井分析理论与方法的概貌,特别是着重反映近 16 年来试井分析方面最新发展成就的实用内容,而不过多地涉及那些复杂的数学推导过程。作者希望本书有助于有关的专家进行试井解释和进一步的研究工作。

对于本书的出版,新疆石油管理局及其采油三厂的领导给予了大力的支持,特别是新疆石油管理局开发部主任地质师邓志学给予了极大的帮助。对于本书的编写,作者的导师石油大学刘尉宁教授和陈钦雷教授在专业理论方面曾给过精心的指导。在编写过程中,作者得到同事刘金香、张琼宇、陈英、王明新、苑春雷和陈强等人的帮助,还要特别感谢新疆石油管理局的代传书,他是该油田一位很有经验的试井分析专家,他及时地提供了一些关键性的资料,使得本书能够更早地完成。此外,还有许多人与部门为本书的资料调研及撰写提供了方便和帮助,在此一并表示深切的谢意!

林加恩

1994. 12. 24

Preface

In the past 60 years, well testing has undergone significant technological changes — evolving from an approach mainly involving the determination of static reservoir pressure to a sophisticated discipline capable of determining the producibility of a well and detecting reservoir heterogeneities in the area around a well. It can be conducted on almost all types of wells with relative ease and less cost on routine basis. The ability to perform reservoir description, evaluation and management and to evaluate well completion efficiency and stimulation effectiveness with a reasonable degree of accuracy is of utmost importance in today's petroleum industry.

In spite of the importance of well testing in the petroleum industry, well — test data have not been used so essentially as log data, partly because much valuable information on the well and the reservoir is never extracted from tests. The proliferation of well — test analysis literature in recent years has made it possible to enhance the efficiency and reliability of well — test analysis and to change the situation.

In the past 16 years, well test analysis has made remarkable advances and achieved a series of important findings in this field. A large number of technical papers and publications on this subject have been presented to address both simple and complex well — reservoir — related phenomena. Numerous analytical models have been presented recently to describe the transient pressure behavior of various types of reservoirs. Now we desire a book coupled with all the new developments and new theories.

The purpose of this book is to review the basic theory and different techniques for analysis of well tests, and to delineate the advantages and limitations of the various analysis methods. It focused mainly on the Western and Chinese petroleum engineering literature and drew on it in well testing. A effort has been made to keep the theoretical presentation as clear and simple as possible and to have derivations minimized. Generally, in this book, greater attention has been given to more recent analysis methods and practical aspects for interpretation of transient tests. This book has also incorporated my field experience and recent achievements in well test analysis.

I wish to thank the leaders concerned of Xinjiang Petroleum Administration Bureau and No. 3 Oil Production Plant of the Bureau for their contributions on publishing the book, especially Deng Zhi Xue, chief engineer of Oil and Gas Development Dept. of the Bureau. I am indebted to my mentors, Prof. Liu Wei Ning and Chen Qin Lei of Petroleum University in Beijing, who pay more attention to the publication of this monograph.

During the preparation of this manuscript, my colleagues provided valuable suggestions and assistance. In particular, Mrs. Liu Jin — Xiang drafted most of the figures and typing some of the manuscript. Mmes. Zhang Qiong — Yu and Chen Ying typing most of it;

Messrs. Wang Ming—Xin, Yuan Chun—Lei and Chen Qiang spent many hours in a detailed study of the draft and made many usefull comments for incorporation into the final manuscript. These are gratefully acknowledged.

Mr. Dai Chuan Shu, a well—test expert in Xinjiang Petroleum Administration Bureau, was kind enough to provide very useful key material he collected on well test analysis. Appreciation is also extended to all the other people for their assistance in this book.

Lin Jia—En

December 24, 1994

目 录

前言

第一章 试井分析的理论基础	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 四种基本几何流动系统	(2)
第三节 无因次变量	(5)
第四节 试井的通用理论	(6)
第五节 试井解释模型	(10)
第二章 特征直线分析法	(13)
第一节 概述	(13)
第二节 径向流动模型	(13)
第三节 半对数分析	(15)
第四节 储层探边测试	(20)
第五节 线性流动分析	(21)
第六节 双线性流分析	(23)
第七节 球形流分析	(23)
第八节 一阶压力导数方法	(25)
第九节 对数时间的压力导数方法	(25)
第三章 典型曲线分析法	(27)
第一节 概述	(27)
第二节 Gringarten 典型曲线	(28)
第三节 Bourdet 压力导数典型曲线	(29)
第四节 重整压力典型曲线	(31)
第五节 半对数典型曲线	(33)
第六节 积分压力及其导数典型曲线	(33)
第七节 二阶压力导数典型曲线	(35)
第四章 基本储层模型	(36)
第一节 概述	(36)
第二节 双重孔隙介质储层模型	(36)
第三节 双重渗透介质储层模型	(39)
第四节 复合储层模型	(40)
第五节 三重孔隙介质储层模型	(41)
第六节 分形介质储层模型	(42)
第七节 天然裂缝性储层模型	(44)
第八节 多层储层模型	(44)

第五章 内边界模型	(46)
第一节 概述	(46)
第二节 表皮模型	(46)
第三节 井筒储存模型	(48)
第四节 压裂井模型	(51)
第五节 局部打开井模型	(56)
第六节 斜井模型	(57)
第七节 水平井模型	(60)
第六章 顶底边界模型	(65)
第一节 概述	(65)
第二节 物理模型	(66)
第三节 单层系统局部打开井的试井分析	(66)
第四节 多层储层中的局部打开井的试井分析	(69)
第五节 底水作用下的试井分析	(72)
第七章 外边界模型	(75)
第一节 概述	(75)
第二节 定压外边界模型	(75)
第三节 直线封闭断层模型	(76)
第四节 多条直线封闭断层模型	(77)
第五节 局部连通断层模型	(80)
第六节 高渗透性断层模型	(83)
第八章 变压边界模型	(85)
第一节 概述	(85)
第二节 物理模型	(86)
第三节 线性压力变化速度方程	(86)
第四节 广义拟稳定流动方程	(88)
第五节 广义拟稳定流的压力降落特性方程	(89)
第六节 无限多井系统中一口生产井的压力恢复分析理论	(90)
第七节 有限封闭多井系统中一口生产井的压力恢复分析理论	(92)
第八节 广义拟稳定流的压力恢复特性方程	(95)
第九节 多井系统中一口注水井的压力落差分析理论	(96)
第十节 小结	(97)
第九章 不同流体的流动模型	(99)
第一节 概述	(99)
✓第二节 非达西流动模型	(99)
第三节 热采井模型	(101)
第四节 非牛顿流动模型研究概况	(102)
第五节 未压裂的非牛顿流体注入井模型	(104)
第六节 压裂的非牛顿流体注入井模型	(108)

第七节	非牛顿流体与牛顿流体的复合储层模型·····	(110)
第八节	非牛顿流体生产井模型·····	(111)
第十章	气井模型·····	(113)
第一节	概述·····	(113)
第二节	基本定义·····	(113)
第三节	拟压力分析法·····	(115)
第四节	拟压力的简化分析方法·····	(118)
第五节	标准化拟变量分析法·····	(119)
第十一章	多相流井模型·····	(120)
第一节	概述·····	(120)
第二节	基本定义·····	(121)
第三节	油气水三相流动模型·····	(122)
✓第四节	油水两相流模型·····	(125)
第五节	油气两相流模型·····	(128)
第十二章	凝析气井模型·····	(135)
第一节	概述·····	(135)
第二节	物理模型·····	(135)
第三节	基本定义·····	(136)
第四节	储层积分法·····	(136)
第五节	稳定流模拟法·····	(137)
第六节	单相气体模拟法·····	(139)
第七节	标准化拟变量方法·····	(140)
第十三章	注水井模型·····	(143)
第一节	概述·····	(143)
第二节	双区复合储层模型·····	(143)
第三节	考虑饱和度梯度的注水井模型·····	(145)
第四节	Yeh—Agarwal 模型·····	(145)
第十四章	其他模型·····	(152)
第一节	概述·····	(152)
✓第二节	变流量试井分析·····	(152)
第三节	压力恢复续流段数据分析·····	(154)
第四节	DST 试井分析·····	(158)
第五节	人工举升井试井分析·····	(160)
第六节	多井试井分析·····	(161)
第十五章	稳定流试井模型·····	(164)
第一节	概述·····	(164)
✓第二节	单相油井产能试井·····	(164)
第三节	气井产能试井·····	(165)
第四节	油气两相流井产能试井·····	(167)

第五节	注水井稳定试井.....	(170)
第十六章	计算机辅助试井分析.....	(171)
第一节	概述.....	(171)
第二节	数据确认.....	(171)
第三节	数据预处理.....	(175)
第四节	模型识别.....	(179)
第五节	模型参数计算.....	(181)
第六节	解释模型检验.....	(182)
第七节	试井设计.....	(183)
第八节	试井分析软件设计.....	(185)
附录 A	不同流动阶段在各种识别图和诊断图上的响应特征	(187)
附录 B	常见试井解释模型在诊断图上的响应特征	(196)
附录 C	符号说明	(208)
参考文献		(214)

Contents

Preface

Chapter 1 Basics of Well Test Theory	(1)
Section 1 Introduction	(1)
Section 2 Four Basic Flow Geometry Systems	(2)
Section 3 Dimensionless Variables	(5)
Section 4 The General Theory of Well Test	(6)
Section 5 Well—Test Interpretation Models	(10)
Chapter 2 Specific Straight—Line Analysis Methods	(13)
Section 1 Introduction	(13)
Section 2 The Radial Flow Models	(13)
Section 3 Semilog Analysis	(15)
Section 4 Reservoir Limit Test	(20)
Section 5 Linear Flow Analysis	(21)
Section 6 Bilinear Flow Analysis	(23)
Section 7 Spherical Flow Analysis	(23)
Section 8 The Primary Pressure Drivative Method	(25)
Section 9 The Pressure Drivative Method	(25)
Chapter 3 Type—Curve Analysis Methods	(27)
Section 1 Introduction	(27)
Section 2 Gringarten's Type—Curves	(28)
Section 3 Bourdet's Pressure Derivative Type—Curves	(29)
Section 4 Pressure/Pressure—Derivative Ratio Type—Curves	(31)
Section 5 Semilog Type Curves	(33)
Section 6 Integral—Pressure and its Derivative Type Curves	(33)
Section 7 The Second Order Derivative Type Curves	(35)
Chapter 4 Basic Reservoir Models	(36)
Section 1 Introduction	(36)
Section 2 Double—Porosity Models	(36)
Section 3 Double—Permeability Models	(39)
Section 4 Composite Models	(40)
Section 5 Triple—Porosity Models	(41)
Section 6 Fractal Models	(42)
Section 7 Naturally Fractured Models	(44)
Section 8 Multi—Layer Models	(44)
Chapter 5 Inner Boundary Models	(46)

Section 1 Introduction	(46)
Section 2 Skin Models	(46)
Section 3 Wellbore Storage Models	(48)
Section 4 Fractured Well Models	(51)
Section 5 Partial Perforation Well Models	(56)
Section 6 Slanted Well Models	(57)
Section 7 Horizontal Well Models	(60)
Chapter 6 Top and Bottom Boundary Models	(65)
Section 1 Introduction	(65)
Section 2 Physical Models	(66)
Section 3 Pressure Transient Analysis for a Partially Penetrating Well in a Single—Layered Reservoir	(66)
Section 4 Pressure Transient Analysis for a Partially Penetrating Well In a Multi—Layer Reservoir	(69)
Section 5 Well Test Analysis in Bottom—Water—Drive Reservoirs	(72)
Chapter 7 Outer Boundary Models	(75)
Section 1 Introduction	(75)
Section 2 Constant Pressure Boundary Models	(75)
Section 3 Single Sealing—Fault Model	(76)
Section 4 Multiple Sealing—Fault Models	(77)
Section 5 Partially Communicating Fault Models	(80)
Section 6 High Permeability Fault Models	(83)
Chapter 8 Changing Pressure Boundary Models	(85)
Section 1 Introduction	(85)
Section 2 Physical Models	(86)
Section 3 Linear Pressure—Changing—Rate Equation	(86)
Section 4 Generalized Pseudo—Steady Radial Flow Equations	(88)
Section 5 The Dimensionless Wellbore Pressure Equations at the Generalized Pseudo—Steady—State Flow Condition	(89)
Section 6 Pressure Buildup Analysis for a Well Located in an Infinite Multiwell Pattern	(90)
Section 7 Pressure Buildup Analysis for a Well Located in an Multiwell System in a Closed, Bounded Reservoir	(92)
Section 8 The Dimensionless Buildup Pressure Equations at the Generalized Pseudo—Steady—State Flow Condition	(95)
Section 9 Pressure Falloff Analysis for a Well Located in an Multiwell System	(96)
Section 10 Conclusions	(97)
Chapter 9 Reservoir Models Under Different Fluid Flow Conditions	(99)
Section 1 Introduction	(99)

Section 2 Non—Darcy Flow Models	(99)
Section 3 Thermal Oil Recovery Well Model	(101)
Section 4 An Overview of Development of Non—Newtonian Fluid Flow Models	(102)
Section 5 Unfractured Non—Newtonian Fluid Injection Well Model	(104)
Section 6 Fractured Non—Newtonian Fluid Injection Well Model	(108)
Section 7 Non—Newtonian/Newtonian Fluid Composite Model	(110)
Section 8 Non—Newtonian Fluid Production Well Model	(111)
Chapter 10 Gas Well Models	(113)
Section 1 Introduction	(113)
Section 2 Basic Definitions	(113)
Section 3 Pseudo—Pressure Analysis Method	(115)
Section 4 Simplified Pseudo—Pressure Analysis Method	(118)
Section 5 Normalized Pseudo—Variable(Pressure/Time) Analysis Method	(119)
Chapter 11 Multiphase Flow Well Models	(120)
Section 1 Introduction	(120)
Section 2 Basic Definitions	(121)
Section 3 Three—Phase Gas—Oil—Water Flow Models	(122)
Section 4 Two—Phase Oil—Water Flow Model	(125)
Section 5 Two—Phase Gas—Oil Flow Models (Solution—Gas—Drive Reservoirs)	(128)
Chapter 12 Gas—Condensate Well Models	(135)
Section 1 Introduction	(135)
Section 2 Physical Models	(135)
Section 3 Basic Definitions	(136)
Section 4 The Reservoir Integral	(136)
Section 5 The Steady—State Analog	(137)
Section 6 The Single—Phase—Flow Analog	(139)
Section 7 Normalized Pseudo—Variable Method	(140)
Chapter 13 Water Injection Well Models	(143)
Section 1 Introduction	(143)
Section 2 Two—Zone Composite Model	(143)
Section 3 Injection Well Models Considering Saturation Gradients	(145)
Section 4 Yeh—Agarwal Model	(145)
Chapter 14 The Other Models	(152)
Section 1 Introduction	(152)
Section 2 Variable—Rate Well—Test Analysis	(152)
Section 3 Analysis of Afterflow—Dominated Pressure Buildup Data	(154)
Section 4 Drillstem Test Analysis	(158)

Section 5 Artificially Lift Well Test Analysis	(160)
Section 6 Multi—Well Test Analysis	(161)
Chapter 15 Steady—State Flow Test Models	(164)
Section 1 Introduction	(164)
Section 2 Single—Phase Oil Well Deliverability Tests	(164)
Section 3 Gas Well Deliverability Tests	(165)
Section 4 Two—Phase Gas—Oil Flow Well Deliverability Tests	(167)
Section 5 Water—Injection—Well Sabilized Flow Rate Test	(170)
Chapter 16 Computer—Aided Well Test Analysis	(171)
Section 1 Introduction	(171)
Section 2 Data Validation	(171)
Section 3 Data Preparation	(175)
Section 4 Model Identification	(179)
Section 5 Calculation of the Model Parameters	(181)
Section 6 Validatiion of the Interpretation Model	(182)
Section 7 Test Design	(183)
Section 8 Well—Test Analysis Software Design	(185)
Appendix A The Response Features of different Flow Regimes on Various	
Diagnostic Plots	(187)
Appendix B The Response Features of Common Well Test Interpretation Models	
On the Log—Log Plot of Pressure and its Derivative	(196)
Appendix C Nomenclature	(208)
References	(214)

第一章 试井分析的理论基础

第一节 概 述

试井是一种通过获得有代表性储层流体样品、测试同期产量及相应的井底压力资料来进行储层评价的技术。试井技术包括两方面的概念：一是硬件技术，指测试仪器的原理、性能和使用；二是软件技术，指试井分析方法和测试方法等。本书将重点讨论后者。试井分为不稳定压力试井和稳定压力试井，其中不稳定压力试井是迄今为止人们研究最多、理论上最深奥、内容最丰富的领域，因此，人们习惯上将试井和不稳定压力试井认作同一概念。

试井作为一门边缘学科，正处于形成和发展阶段。试井不仅与数学、物理、化学和地质等许多基础学科密切相关，而且还与石油地质工程、钻井工程、采油工程和油藏工程等紧密联系。试井分析理论主要是在多孔介质渗流物理和地下流体力学的基础上建立起来的，贯穿于许多石油工程学科之中。

试井不仅是人们认识储层动态特性的重要手段，而且也是认识生产井和注入井的产、吸能力的重要手段。储层基本特性主要包括五个方面：

- (1) 储层岩石骨架的性质，如岩石的压缩性、孔隙度、渗透率、孔隙大小分布及表面积等。
- (2) 储层中的流体特性，如流体质量、密度、压缩性、粘度及其组分等。
- (3) 流体与岩石的综合特性，如相渗透率、润湿性、毛管压力特征和流体饱和度分布等。
- (4) 储层的构造特性，如储层厚度、深度、范围大小、倾斜度和孔隙裂缝的发育程度及其分布情况等。

(5) 储层能量大小，如储层压力、温度和流体储藏量等。

几个常用储层物性术语定义如下：

孔隙度(ϕ)为连通的孔隙体积占岩石总体积的百分比或小数；

绝对渗透率(K)为岩石完全饱和(或通过)某一种流体时的渗透率；

有效渗透率(K_r)为当多相流体饱和(或通过)岩石时，岩石对某一单相流体的渗透率；

相对渗透率($K_{r,i}$)为有效渗透率与绝对渗透率之比值；

流体饱和度(S_o 、 S_w 和 S_g 等)为各单相流体所占有的孔隙空间的百分比或小数。

试井是一门使用数学知识最多的学科之一，因此，在国内外都吸引了不少数学家从事这门学科的研究。进行试井资料的全面分析和研究所需要的数学知识很广，涉及了许多数学的门类，它们包括微积分、复变函数、数学物理方程、偏微分方程数值解和数理统计等。具体地讲，试井分析及其研究中最常用的数学工具有拉普拉斯(Laplace)变换、Stehfest 数值反演算法、瞬时源函数与格林(Green)函数和各种数值模拟算法等。此外，试井分析与研究中，还有一个重要工具就是计算机软件技术，以致于没有计算机试井分析就无法正常进行。

本书对于上述一般性的数学知识和软件知识不做过多介绍，读者可参阅有关的文献。本章首先介绍贯穿试井这门学科中的一些常用的基本理论知识。

第二节 四种基本几何流动系统

通常试井分析指的是压力不稳定试井分析。全面理解压降和压力恢复期间井的基本流动规律对于正确的试井分析是必要的。在实际试井资料分析中遇到的大多数问题,都会用到四种基本的几何流动规律(图 1.1)。

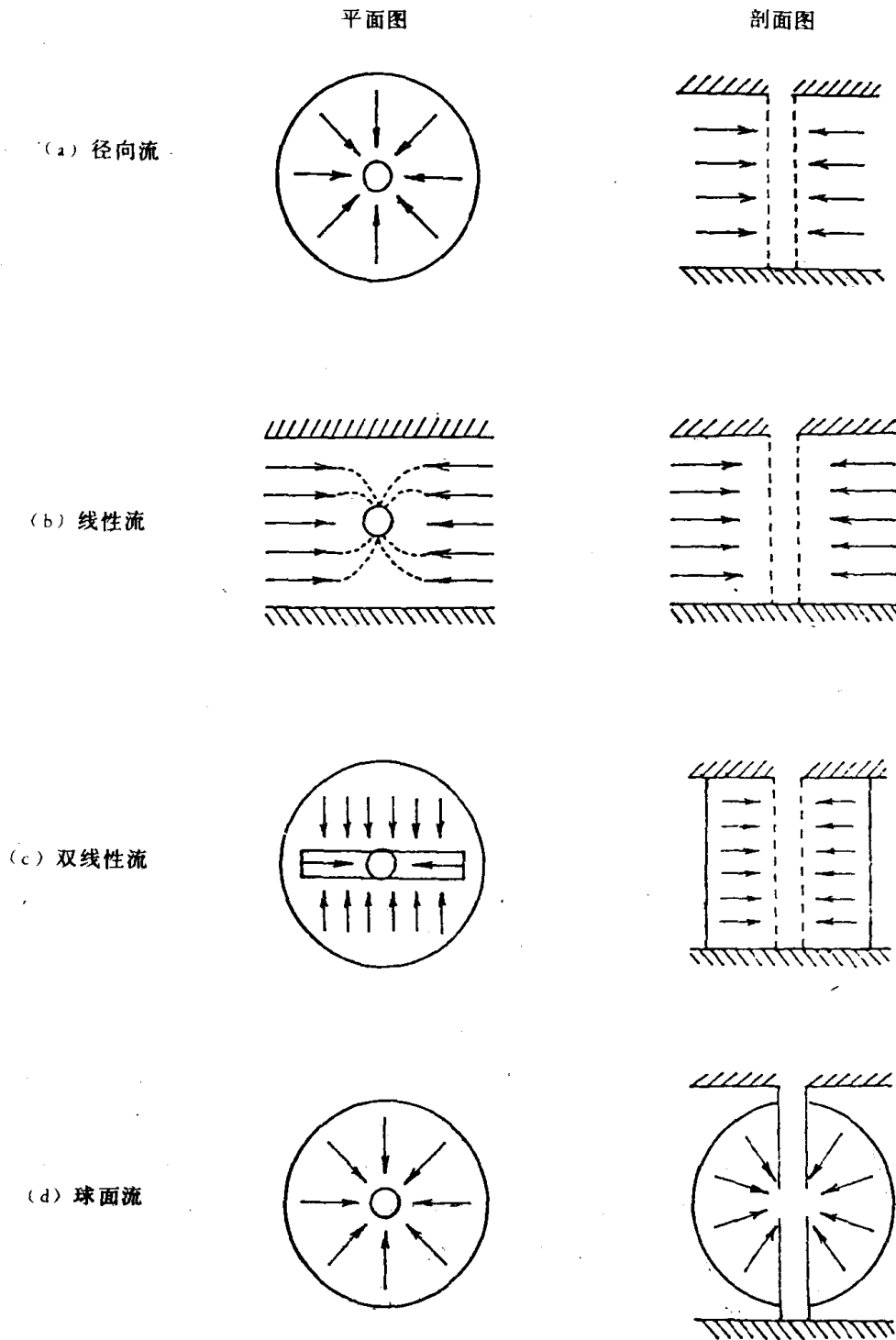


图 1.1 四种基本几何流动模型示意图

一、储层物理模型

在研究储层物理模型时,首先要建立的基本假设有:(1)流动方向无限大,正交各向异性的均质储层,渗透率和孔隙度为常数,水平渗透率为 K_H ,垂直渗透率为 K_V 。对于各向同性地层有 $K_H=K_V=K$ 。(2)单相、微可压缩的流体流动,流体的压缩系数和粘度为常数。(3)压力梯度小,忽略重力和井筒储存影响。(4)在生产前整个储层中压力处处相等,且等于原始压力 p_i 。

二、基本几何流动方程

1. 径向流动方程

$$\frac{\partial p^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \mu C_t}{3.6 K_H} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.1)$$

2. 线性流动方程

$$\frac{\partial p^2}{\partial x^2} = \frac{\phi \mu C_t}{3.6 K_H} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.2)$$

3. 双线性流动方程

$$\frac{\partial p^2}{\partial x^2} + 2 \frac{K_H X_f}{K_f W_f} \frac{\partial p}{\partial y} \bigg|_{y=0} = \frac{\phi \mu C_t}{3.6 K_H} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.3)$$

4. 球形流动方程

$$\frac{\partial p^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \mu C_t}{3.6 K_H} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.4)$$

三、流动方程的基本解

在不考虑表皮效应和井筒储存效应时,上述四种基本方程的典型解(采用法定单位)为:

1. 径向流解

$$p_i - p_{wf} = [2.121 \times 10^{-3} q B \mu / (K h)] \{ \log [K_H t / (\phi \mu C_t r_w^2)] + 0.9077 \} \quad (1.5)$$

2. 线性流解

$$p_i - p_{wf} = (1.239 \times 10^{-2} q B / A_s) \sqrt{\mu / (K_H \phi C_t)} t^{1/2} \quad (1.6)$$

3. 双线性流解

$$p_i - p_{wf} = [(6.2163 \times 10^{-3} q B \mu) / (h \sqrt{K_f W_f} \sqrt[4]{\phi \mu C_t K_H})] t^{1/4} \quad (1.7)$$

4. 球形流解

$$p_i - p_{wf} = [9.21 \times 10^{-2} q B \mu / (r_{sw} K_H)] [1 - \sqrt{\phi \mu C_t r_{sw}^2 / (3.6 \pi K_V)} t^{-1/2}] \quad (1.8)$$

上述各公式中 A_s ——流体流通截面积, m^2 ;

B ——流体体积系数=储层条件的体积/地面标准条件的体积, m^3/m^3 ;

C_t ——综合压缩系数, $1/MPa$;

h ——储层厚度, m ;

K ——孔隙介质的渗透率, μm^2 ;

K_H ——水平渗透率, μm^2 ;

K_V ——垂直渗透率, μm^2 ;

K_f ——裂缝系统的渗透率, μm^2 ;

q ——流量, m^3/d ;

r_w ——井半径, m