

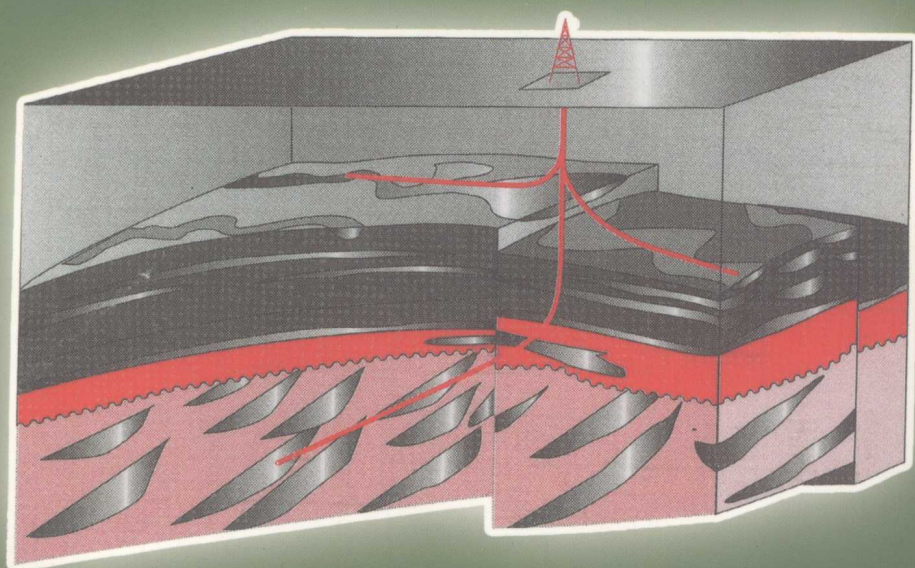
试井解释方法

WELL TESTING: INTERPRETATION METHODS

波雷达特 著

赵业卫 关志忠 邓中先 崔士斌 等译

赵政超 刘德铸 叶加仁 校



石油工业出版社

Well Testing: Interpretation Methods

试井解释方法

波雷达特 著

赵业卫 关志忠 邓中先 崔士斌 等译

赵政超 刘德铸 叶加仁 校

石油工业出版社

版权声明：本书经 Editions Technip 公司授权出版，中文版权归石油工业出版社所有，侵权必究。

All rights reserved @ authorised translation from French language edition published by Editions Technip.

图书在版编目 (CIP) 数据

试井解释方法 / (法) 波雷达特 (Bourdarot, G.) 著; 赵业卫等译.
北京: 石油工业出版社, 2005.3

书名原文: Well Testing: Interpretation Methods

ISBN 7-5021-5021-8

I. 试…

II. ①波… ②赵…

III. 试井—解释—方法

IV. TE353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 017692 号

图字: 01-2003-4482

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.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 河北天普润印刷厂印刷

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12.75

字数: 326 千字 印数: 1—1000 册

定价: 40.00 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

《试井解释方法》翻译委员会名单

专业技术顾问：姜汉桥

主 译：赵业卫

副主译：关志忠 邓中先 崔士斌

委 员：张国禄 徐英莉 李克宁 孙向东 吴冠霖 赵 伟

王晶景 赵 鹏 王晓华 鲍洪涛 李春艳 马丽勤

孙光雄 周 旭 寥家彬 顾元洋 谢长江 王全福

周大胜 祝亚东 韩钢山 陈志华 任德生

译 校：刘德铸 叶加仁

审 订：赵政超

译者序

引进法国石油研究院科研成果进展报告《试井解释方法》一书的目的旨在填补国内石油工程专业、地球物理测井专业、石油地质专业、仪器仪表专业、油藏工程专业本科生和研究生学习试井分析与解释技术方法所需教材的空白，并为国内石油工业工程技术人员进一步深入学习专业知识提供可资借鉴的继续教育参考文献。

早在 1865 年，法国工程师达西就通过大量实验获得通过多孔介质的流量与各种影响因素间的定量关系，揭示出渗流的基本规律。1923 年列宾宗首先提出气体在多孔介质中的渗流理论，奠定了现代气井试井分析的理论基础。1937 年，麦斯盖特发表了关于均质流体渗流的重要著作，给出了计算各种井网条件下油井产量的方法。1942 年贝克莱—列维莱特开发并研制了可计算油井采收量、采收率和开采时间的数学模型及测试仪器。到 1948 年谢尔加乔夫综合了压力恢复曲线、干扰试井等确定储层参数的试井水动力学方法。在此基础上，库提勒克于 1969 年概括了 12 种非达西型渗流曲线特性及解释方法，从而奠定了现代试井设计和分析方法中取决于油藏特性的现代试井解释方法基础，尤其是弹性液体在弹性岩层中的渗流规律理论，继而发展了应用压力恢复曲线、干扰试井和脉冲试井等确定地层参数的水动力学方法，成为试井解释方法的理论与实践方面的技术先驱之一。20 世纪 70 年代至 21 世纪初是现代试井设计、分析、解释方法和油藏工程方法以及渗流力学方法和研究与应用技术突飞猛进的时代，共出版专著 40 余部。1985 年到 2000 年共发表与现代试井设计、分析、解释方法和油藏工程方法以及渗流力学方法相关专著 36 部。石油界科研人员自始至终都是站在现代试井设计、分析、解释方法和油藏工程方法以及渗流力学方法研究领域前沿的科学工作者。

本书由法国石油研究院资深试井解释专家 G. BOURDAROT 博士

经数年搜集整理相关资料并结合自身试井解释经验编写而成。本书论述了从试井基本原理（第1章）到脉冲试井解释方法（第23章）内容在内的共7篇23章专题内容。本书重点阐述了包括常规试井方法、标准典型曲线法、图解法、计算机辅助图解法及基于各相关方法而导出的试井资料解释方法在内的各种试井条件下的试井解释最适合方法。本书采用的各类必需方程式在用于解释试井资料时均避免冗长的数学推导整理过程。书中所列大量参考文献可供本书读者据此逐步按照各方程式推导过程追根溯源，查出相应的数学求解方法。该书旨在试图阐明如何根据诸如断层构造油气藏、湖成油气藏、交切断块层状构造油气藏、恒压边界油气藏、圈闭油气藏等油气藏的边界条件以及诸如井眼部分穿透储层的油气井、斜井、人工裂缝井、水平井、注入井等井身结构特点与油藏构造特点来进行合理的试井分析并加以解释。本文还增加了包括天然裂缝性油气藏和双重孔隙介质层状油气藏方面的试井解释方法。此外，本书还给出了如何一次性实施现场测试工艺而同时完成多口井试井工艺过程与试井结果解释方法、干扰试井及相关解释方法和脉冲试井及相关解释方法。

本书可供从事油气田勘探开发的工程技术人员和技术干部以及高等院校师生学习参考。在本书翻译过程中虽竭尽全力，参考了很多同类专业书籍，但国内此类出版物中缺乏较系统的综合性专著，故本书仍然存在很多不足甚至谬误之处，恳请专家不吝赐教，批评指正。

译者谨识

2004年12月

目 录

基本原理

1 试井基本原理	(3)
1.1 引言	(3)
1.2 达西定律	(3)
1.3 压缩特性	(4)
1.4 水力扩散系数方程式	(5)
1.5 水力扩散系数方程式求解	(7)
1.6 压缩层	(8)
1.7 探测半径	(9)
1.8 流态	(10)
1.9 叠加原理	(10)
2 井筒储存效应	(12)
2.1 定义	(12)
2.2 自喷井	(12)
2.3 机采井	(13)
2.4 数量级	(13)
2.5 压力变化	(13)
2.6 井底流量	(14)
2.7 井筒储存效应结束	(14)
3 表皮效应	(16)
3.1 定义	(16)
3.2 无穷薄表皮	(16)
3.3 有限厚度表皮	(16)
3.4 有效半径法	(17)
3.5 表皮系数的广义概念	(18)

试井解释方法

4 常规试井解释方法	(25)
4.1 压降试井解释方法	(25)
4.2 压力恢复试井：赫诺解释方法	(26)
4.3 压力恢复试井：MDH 解释法	(29)
4.4 流量变化后的试井解释方法	(30)

4.5	流量变化历程简化法	(32)
4.6	探测半径的恢复	(34)
5	典型曲线	(35)
5.1	引言	(35)
5.2	GRINGARTEN 典型曲线	(35)
5.3	解释步骤	(37)
5.4	采用压力恢复阶段典型曲线进行试井解释	(39)
6	以压力导数典型曲线图版进行试井解释的方法	(42)
6.1	压力导数基本公式	(42)
6.2	压力导数公式的基本特点	(42)
6.3	作为诊断工具的压力导数公式	(43)
6.4	典型曲线分析	(44)
6.5	借助压力导数公式直接解释	(47)
6.6	结论	(48)

油气藏边界条件

7	线性封闭断层	(52)
7.1	基本特点	(52)
7.2	假设方法	(52)
7.3	常规解释方法	(53)
7.4	典型曲线分析压力导数法	(54)
8	渗流通道	(56)
8.1	动态渗流通道描述	(56)
8.2	线性流	(56)
8.3	常规解释方法	(57)
8.4	有边界条件约束的渗流通道	(58)
8.5	随流量变化的压力恢复曲线	(59)
8.6	典型曲线分析压力导数法	(60)
9	交切断层	(62)
9.1	常规分析方法	(62)
9.2	典型曲线压力导数分析法	(63)
10	恒压边界油气藏	(64)
10.1	常规解释方法	(64)
10.2	典型曲线压力导数分析法	(66)
11	封闭油气藏	(67)
11.1	生产井拟稳态流试井解释方法	(67)
11.2	关井平均压力解释方法	(73)
12	产能指数	(79)
12.1	定义	(79)
12.2	无限边界作用阶段产能指数	(79)

12.3	拟稳态流阶段产能指数	(79)
12.4	产能指数的理论值和实测值	(80)

与油藏性质相关的试井解释方法

13	天然裂缝性油气藏	(83)
13.1	天然裂缝性油气藏地质几何形状特性	(83)
13.2	孔隙度	(84)
13.3	产能系数	(85)
13.4	渗透率	(86)
13.5	基质—裂缝流体交换系数 λ	(86)
13.6	流态分析	(87)
13.7	天然裂缝性油气藏类双重介质油气藏中介质间拟稳态渗流模型与瞬变 渗流模型选择	(92)
13.8	典型曲线分析	(93)
13.9	典型曲线压力导数图版拟合法	(97)
13.10	裂缝性油气藏试井解释方法二例	(99)
14	双重孔隙介质层状油气藏	(102)
14.1	引言	(102)
14.2	双重孔隙介质双层油气藏特性简介	(102)
14.3	Bourdet 模型	(102)
14.4	双重孔隙介质双层油气藏试井解释方法简析	(103)

与井相关的试井解释方法

15	井眼部分穿透储层的油气井试井解释方法	(109)
15.1	引言	(109)
15.2	井眼部分穿透储层的油气井渗流	(110)
15.3	射孔孔眼径向流	(110)
15.4	球状流	(111)
15.5	储层净厚条件下的径向流	(112)
15.6	平均压力和外推压力	(114)
15.7	压力导数	(115)
15.8	模糊解释法	(116)
15.9	与岩心分析结果的比较	(116)
15.10	部分射穿储层的射孔孔眼与裂缝性油气藏连通的渗流流态	(117)
16	斜井试井解释方法	(118)
16.1	引言	(118)
16.2	斜井流态和表皮系数	(118)
16.3	渗透率各向异性的影响	(119)
17	人工裂缝井试井解释方法	(120)

17.1	裂缝的描述	(120)
17.2	人工裂缝井渗流常规解释方法	(120)
17.3	典型曲线分析压力导数法	(125)
17.4	典型曲线	(128)
17.5	结论	(129)
18	水平井试井解释方法	(131)
18.1	水平井渗流流态简介	(131)
18.2	水平井流态常规试井解释方法	(131)
18.3	典型曲线压力导数法	(133)
19	注入井试井解释方法	(135)
19.1	注入井渗流流态简介	(135)
19.2	流态简介	(135)
19.3	典型曲线压力导数法	(138)
19.4	注入井试井目标	(139)

与储层流体特性相关的试井解释方法

20	气井试井解释方法	(143)
20.1	拟压力	(143)
20.2	与达西定律的偏差	(145)
20.3	气井试井解释方法	(146)
20.4	绝对无阻流量时的敞喷测试 (AOFPT) 方法简述	(148)
20.5	绝对无阻流量时的敞喷常规测试 (AOFPT) 方法简述	(148)
20.6	绝对无阻流量时的敞喷测试结果解释方法: HOUPEURT 法	(150)
20.7	绝对无阻流量时的敞喷测试结果解释方法: 经验公式法	(152)
20.8	其他测试方法	(153)
21	多相流	(157)
21.1	引言	(157)
21.2	PERRINE 法的假设条件	(157)
21.3	PERRINE 法	(158)
21.4	泡点压力条件下采油井产能指数	(160)

干扰试井解释方法

22	干扰试井解释方法	(165)
22.1	干扰试井基本概念	(165)
22.2	均质油气藏干扰试井解释方法	(165)
22.3	裂缝性油气藏干扰试井解释方法	(168)
22.4	流量变化历程的影响	(170)
22.5	表皮系数和井筒储存效应的影响	(171)
22.6	干扰试井解释方法的目标	(172)

23 脉冲试井解释方法.....	(175)
23.1 简介.....	(175)
23.2 脉冲试井解释方法：KAMAL 法和 BRIGHAM 法	(176)
符号及函数释义.....	(181)
附表 矿场试井解释方法计算所采用的实用单位.....	(187)
参考文献.....	(188)

基本原理

1 试井基本原理

本节所论试井基本原理和本书后续章节所论述的计算方法与解释方法均假设油藏中仅存单相流，即油相流。

本书第 21 章则阐述了油藏流体为气相流条件或多相流时的试井基本原理和解释方法。

1.1 引言

概括地说，试井的目的就是旨在获取某井的信息和某油气藏的信息。

为了获得所需的试井信息，井流量一定要处于变化状态且这种变化状态的流量将对油藏实际现存压力产生波动性影响。

对压力随时间变化动态特征进行测试并对所测试结果进行解释则可推导出油藏数据和井数据。

绝大多数常规试井方法则采用井流量变化时的动态特征压力数据；而干扰试井的目的则是测定井间连通情况和求解井间地层特性参数。

采用一系列流体力学定律来解释压力变化特性。

本节将介绍一种主要的流体力学定律，即达西定律，并给出与试井有关的推导结果。

1.2 达西定律

达西定律用于描述多孔介质渗流特性的基本特征。达西定律的应用及其与试井有关的推导结果见如下各段所述。

1.2.1 与试井解释方法相关的达西定律

根据基本达西定律，渗滤流过岩样的流体流量与下述各变量成比例变化：

- 1) 施加于岩样上的压力梯度。
- 2) 岩样横截面积 (S)。
- 3) 流体流度系数 (K/μ)。

在流体流量和其他参数恒定不变时，达西定律在一定时间间隔内有效。

达西定律并不取决于介质孔隙度、流体压缩系数或岩石压缩系数。

1.2.2 达西定律的向量表达式

达西定律的向量表达式为：

$$\vec{q} = -\frac{K}{\mu} S \vec{\text{grad}} p \quad (1.1)$$

试井解释方法研究的是流体流量变化后所发生的实测压力变化特性。由于在试井过程中

流量已经发生变化，达西定律在宏观上并不能描述井周围介质的实际渗流特征。

达西定律也可以用流体渗流速度的函数公式来表示：

$$\vec{v} = \frac{\vec{q}}{S} \quad (1.2)$$

$$\vec{v} = -\frac{K}{\mu} \overrightarrow{\text{grad} p} \quad (1.3)$$

流体在多孔介质中的渗流速度与多孔介质中流体表观渗流速度不同，多孔介质流体表观渗流速度为 $\frac{\vec{v}}{\phi S_0}$ 。

1.2.3 流体的流动流态为径向流时达西定律的表达式

流体流动流态为径向流时的达西定律表达式为：

$$q = \frac{K}{\mu} 2\pi r h \frac{\partial p}{\partial r} \quad (1.4)$$

就式 (1.4) 从距井眼轴线距离的两个值 r_w 和 r_e (如图 1.1 所示) 加以积分后可得出：

$$q = \frac{2\pi K h (p_w - p_e)}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (1.5)$$

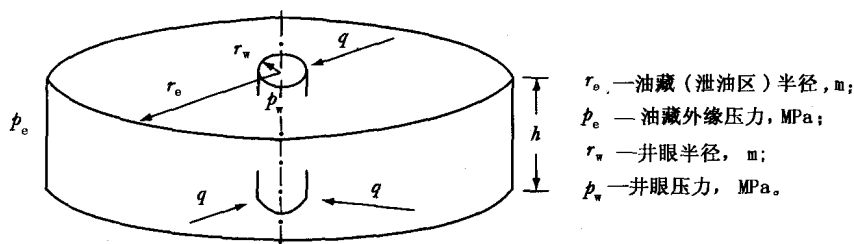


图 1.1 以流量为 q 的径向流向位于泄油区半径为 r_e 的油藏中心点渗流时的几何形状示意图

1.3 压缩特性

若岩石与流体均为可压缩介质，则可获取某井的所有试井信息数据。

任何物质在恒温条件下单位压力变量的物质体积相对变化所定义的压缩系数计算公式为：

$$c = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (1.6)$$

以密度表示的任何物质在恒温条件下单位压力变量的物质体积相对变化所定义的压缩系数计算公式为：

$$c_e = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \quad (1.7)$$

1.3.1 油藏压缩总系数

油藏中可压缩的几种组分是：

- 1) 油相。
- 2) 水相（包括束缚水饱和度条件下的水相）。
- 3) 孔隙体积本身。

当发生减压现象时，则储层流体可被采出：

- 1) 在流体膨胀特性作用下：

$$\text{油相} \quad \Delta V_o = -c_o S_o V_p \Delta p \quad (1.8)$$

$$\text{水相} \quad \Delta V_w = -c_w S_w V_p \Delta p \quad (1.9)$$

- 2) 在储层孔隙体积 V_p 减小的条件下，则有下列情况发生：

在储层流体压力和岩石静压力影响作用下，可以导致孔隙体积处于平衡状态。

随着减压过程的持续进行，储层流体压力降低而岩石静压力保持恒定。随着孔隙体积的减小，可导致普通流体的采出：

$$\Delta V_p = -c_p V_p \Delta p \quad (1.10)$$

相比之下，物质本身压缩系数相对于减压程度可忽略不计。

某一个孔隙体积单位的压缩总系数是该单位孔隙体积中所含的各种可压缩组分的压缩系数总和，即：

$$c_t = c_o S_o + c_w S_w + c_p$$

单位体积的多孔介质储能系数为 ϕc_t 。

1.3.2 等效压缩系数

如果某油藏按下述条件建立等效压缩系数模型，即：

- 1) 由孔隙度为 ϕS_o 的不可压缩多孔岩石组成。
- 2) 以等效压缩系数表示流体压缩系数，则：

$$c_e = \frac{c_o S_o + c_w S_w + c_p}{S_o} \quad (1.11)$$

1.3.3 数量级

压缩系数的数量级如下：

- 1) 油相压缩系数的数量级： $(3 \sim 10) \times 10^{-6} \text{psi}^{-1}$ 。
- 2) 水相压缩系数的数量级： $3 \times 10^{-6} \text{psi}^{-1}$ 。
- 3) 孔隙空间压缩系数的数量级： $(3 \sim 100) \times 10^{-6} \text{psi}^{-1}$ 。

1.4 水力扩散系数方程式

水力扩散系数方程式表示油藏中压力随时间的变化特性。水力扩散系数方程式基于两个

定律和一个流态方程式而推出。

1.4.1 流体渗流流态方程式

假设某流体流动渗流相态符合达西定律，但在试井期间的整个过程中不能从宏观角度应用达西定律，若流量刚发生变化，则不能将流体视为不可压缩相。

如果各个参数和流体流量按常数考虑，则在时间间隔中，可以宏观地应用达西定律。

此时所应用的流体流态方程式同式 (1.3)，即：

$$\vec{v} = -\frac{K}{\mu} \text{grad} p$$

式 (1.3) 中未考虑重力的作用，在绝大多数试井解释方法中均做此种假设。

1.4.2 物质平衡方程式

油藏体积中所包含的流体质量变量等于在某时间间隔中流体流入质量与流体流出质量之差，即：

$$\text{div} \rho \vec{v} + \frac{\partial (\rho \phi S_o)}{\partial t} = 0 \quad (1.12)$$

1) 流体流态方程式。

处于流动状态的流体的等效压缩系数与随压力变动而变化的流体重力之间存在下述关系：

$$c_e = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$$

2) 水力扩散系数方程式。

借助达西定律方程式 (1.3) 和压缩系数计算公式 (1.7) 并考虑到物质平衡方程式 (1.12)，可推导出随压力和密度变化的多孔介质中流体渗流速度方程式。

压力变量表达式为：

$$\Delta p + c_e (\overrightarrow{\text{grad} p})^2 - \frac{\phi \mu c_t}{K} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (1.13)$$

两个假设条件是：

1) 流体压缩系数小且为常数，此种情况适用于流体为液体而非气体。

2) 压力梯度低，此种情况适用于流体流量较低的油藏；式 (1.13) 中的 $c_e (\overrightarrow{\text{grad} p})^2$ 项比其他两项均小。式 (1.13) 可以简化成常用水力扩散系数方程式，即：

$$\Delta p - \frac{1}{k} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (1.14)$$

式中， $k = \frac{K}{\phi \mu c_t}$ ， k 系指多孔介质中水力扩散系数。

多孔介质中水力扩散系数是流体流度系数 K/μ 与油藏储能系数 ϕc_t 之比。

径向流条件下的多孔介质中水力扩散系数方程式为：