

WELL TEST ANALYSIS:

THE USE OF ADVANCED INTERPRETATION MODELS

现代试井 解释模型及应用

(法) Dominique Bourdet 著
张义堂 李贵恩 高朝阳 等译

石油工业出版社

现代试井解释模型及应用

(法) Dominique Bourdet 著
张义堂 李贵恩 高朝阳 等译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了单相流体、多相流体及气藏试井解释原理、方法和最新的模型。并分析了井筒条件、储层、边界条件等对试井解释产生影响的因素。还涵盖了特殊试井,如 DST 测试及单井垂向干扰试井等。通过一些实例说明试井解释模型的具体应用。

本书适合从事试井的工程技术人员及院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代试井解释模型及应用/ (法) 布尔特 (Bourdet, D.) 著;
张义堂等译. —北京: 石油工业出版社, 2007. 5

书名原文: Well Test Analysis: The Use of Advanced Interpretation Models

ISBN 978 - 7 - 5021 - 5929 - 0

I. 现…

II. ①布…②张…

III. 试井 - 解释 - 模型

IV. TE 353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 009251 号

Copyright © 2002 by Elsevier Science B. V.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system, or transcribed in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and recording, without the prior written permission of the publisher.

本书经 Elsevier Science B. V. 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 - 2006 - 6596

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](http://www.petropub.cn)

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 18

字数: 460 千字 印数: 1—2000 册

定价: 70.00 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

前 言

在过去的二十几年内，试井解释技术得到了迅速发展。伴随高精度压力测量技术和先进计算机的应用，由试井可以得到更实用更准确的信息。压力导数解释新方法放大了井和油藏（包括地下水文系统）的压力特征，由于试井数据曲线诊断方法的改进，以及试井解释工程师得到的理论模型及解的数目不断增多，目前的试井解释软件为压力不稳定试井分析提供了一系列复杂井和复杂构造油气藏解释模型。

本书内容广泛，覆盖了试井分析的所有方面，详细介绍了最新的试井解释模型，并举例进行了说明，同时细致地讨论了试井数据的实际解释结果。对于因操作条件导致测试资料与理论不相符的情况，要进行正确的解释必须建立相应的数据处理规则。所附文献对基本的试井解释技术和相关理论已进行了详细讨论，所以本书对这些内容仅进行简单归纳，而把重点放在复杂系统的计算机解释上。在这本书中，试井解释工程师不仅能找到试井分析过程中遇到的不同问题的解决方案，同时还能更好地理解所涉及的试井的物理过程以及解释结果的意义和局限性。

前两章主要是简单介绍试井解释的方法学。第 1 章介绍了各种类型的试井方法、几种典型井的压力响应曲线和常用试井解释术语。第 2 章介绍了不同的解释技术，并详细说明了不同方法的应用条件。

在第 3 章到第 5 章中，阐述了对不同井、油藏和边界条件的基本解释模型。第 6 章描述了干扰试井解释方法。第 1 章到第 6 章介绍了单相流体（油或水）试井解释方法和模型，第 7 章和第 8 章则分别讨论了气藏和多相流试井问题。第 9 章介绍了特殊试井如 DST 测试、单井垂向干扰试井等。第 10 章讨论了几个使试井分析复杂化的影响因素，并对试井解释方法进行了总结。

尽管石油工业界做了大量努力来尝试应用米制单位，书中所有的图和方程还是采用了油田英制单位，附录中给出了米制单位公式。

本书中引用的几个油田实例在技术论文中已经发表过。测试数据和解释结果在网站 [http: //elsevier. com/locate/welltest](http://elsevier.com/locate/welltest) 中可以查到。

书中的大量内容是在过去的 25 年里与许多试井解释专家进行讨论的基础上写出的，我要感谢 Alain Gringarten 在此书编写过程中提出的建议和支持，我还要感谢 Piers Johnson 对本书的全面修订。

准备本书的图形时，使用了两个解释软件包，即 WTS 公司的 PIE 和 KAPPA 公司的 SAPHIR。

作者

2001 年 12 月，巴黎

备注：Dominique Bourdet 博士在石油与天然气工业领域工作超过了 25 年。他是试井分析技术领域许多著作的作者。他主要的研究方向是裂缝油藏分析。他提出的压力导数分

析方法已成为石油工业试井解释的标准方法。他研究新的试井解释技术，以便给现场操作提供技术支持，推进试井解释软件包的开发。他是一个独立咨询顾问，精通非常规系统试井的设计、监督和解释。他在工业领域和大学校园从事试井解释教学工作 20 多年，其理论教学体系系统而又独具风格。

目 录

1	不稳定试井原理	(1)
1.1	简介	(1)
1.1.1	试井概念	(1)
1.1.2	试井解释方法	(3)
1.2	典型流态	(3)
1.2.1	流态的类型	(3)
1.2.2	井筒储集	(4)
1.2.3	径向流表皮系数(均质储层)	(5)
1.2.4	压裂井(无限导流裂缝):线性流	(8)
1.2.5	裂缝井(有限导流裂缝):双线性流	(8)
1.2.6	部分射开井:球形流	(9)
1.2.7	有界储层(一条封闭断层)	(10)
1.2.8	封闭储层:拟稳态流	(11)
1.2.9	定压边界:稳态流	(12)
1.3	井和储层特征	(12)
1.3.1	井的压力响应	(12)
1.3.2	采油指数	(12)
2	解释方法	(14)
2.1	双对数曲线	(14)
2.2	压力曲线分析	(15)
2.2.1	典型压力曲线实例:“均质储层中具有井筒储集效应和表皮效应的井”	(15)
2.2.2	关井期	(16)
2.2.3	压力解释方法	(20)
2.3	压力导数	(21)
2.3.1	定义	(21)
2.3.2	典型压力导数曲线:“均质储层中具有井筒储集效应和表皮效应的井”	(21)
2.3.3	其他特征流态	(22)
2.3.4	压力恢复分析	(25)
2.3.5	数据求导	(25)
2.3.6	压力导数曲线	(26)
2.4	解释坐标	(26)
3	井筒条件	(28)
3.1	具有井筒储集和表皮效应的井	(28)

3.1.1	模型描述	(28)
3.1.2	均质储层具有井筒储集和表皮效应井的典型压力和压力导数曲线	(28)
3.1.3	压力和导数曲线的拟合方法	(30)
3.1.4	特征直线段及解释方法	(31)
3.1.5	表皮系数讨论	(31)
3.2	无限导流能力或均匀流量垂直裂缝	(33)
3.2.1	模型描述	(33)
3.2.2	无限导流能力裂缝井的典型压力及压力导数曲线	(33)
3.2.3	压力和导数曲线的拟合过程	(35)
3.2.4	特征直线段	(36)
3.3	有限导流垂直裂缝	(37)
3.3.1	模型描述	(37)
3.3.2	有限导流能力垂直裂缝井的典型压力及压力导数曲线	(38)
3.3.3	表皮系数讨论	(39)
3.3.4	压力和导数曲线的拟合方法	(39)
3.3.5	特征直线解释	(40)
3.3.6	裂缝中的流量分布	(41)
3.3.7	油田实例	(41)
3.4	部分射开井	(42)
3.4.1	模型描述	(42)
3.4.2	上下为封闭边界模型的压力响应	(42)
3.4.3	表皮系数的讨论	(44)
3.4.4	压力和导数曲线的拟合	(45)
3.4.5	特征直线分析	(46)
3.4.6	射开层段数的影响	(47)
3.4.7	上界或下界为定压边界	(47)
3.4.8	油田实例	(47)
3.5	斜井	(49)
3.5.1	特征	(49)
3.5.2	表皮系数讨论	(49)
3.5.3	特征直线分析	(50)
3.6	水平井	(50)
3.6.1	模型描述	(50)
3.6.2	特征流态方程	(53)
3.6.3	导数曲线特征	(54)
3.6.4	水平井的表皮系数	(56)
3.6.5	压力和导数曲线的拟合	(57)
3.6.6	特征直线分析	(58)
3.6.7	压力恢复分析	(60)
3.6.8	油田实例	(60)

3.6.9	水平井模型的讨论	(60)
3.6.10	人工压裂水平井	(64)
3.6.11	变渗透率储层中的水平井	(66)
3.6.12	多分支水平井	(69)
3.7	表皮系数	(69)
3.7.1	总表皮系数的构成	(69)
3.7.2	几何表皮和压力导数曲线	(70)
4	储层非均质效应	(72)
4.1	裂缝储层	(72)
4.1.1	双孔介质模型	(73)
4.1.2	双孔介质拟稳态窜流模型 (存在井筒储集效应和表皮效应)	(75)
4.1.3	双孔介质, 不稳态窜流模型 (存在井筒储集效应和表皮效应)	(85)
4.1.4	广义的双孔介质模型	(92)
4.1.5	双孔介质模型分析结果的讨论	(96)
4.1.6	油田实例	(98)
4.2	无窜流和有窜流的层状储层	(99)
4.2.1	双渗透模型	(101)
4.2.2	井中两层同时生产时的双渗压力特征 (具有井筒储集和两个表皮系数)	(102)
4.2.3	井中两层只有一层生产时的双渗压力特征 (具有井筒储集和表皮系数)	(105)
4.2.4	辅助的特征分析直线	(108)
4.2.5	油田实例	(109)
4.2.6	双渗透模型的扩展	(109)
4.2.7	具有相同和不同原始压力的混层系统	(111)
4.3	复合储层	(112)
4.3.1	复合储层模型	(113)
4.3.2	径向复合储层模型	(114)
4.3.3	线性复合储层模型	(118)
4.3.4	复合储层模型的扩展	(120)
4.3.5	注水井	(123)
4.4	复合储层非均质性	(124)
4.4.1	裂缝性多层储层	(124)
4.4.2	径向复合双孔介质储层	(125)
4.4.3	径向复合双渗透储层	(126)
5	储层边界效应	(129)
5.1	均质储层中的单一封闭断层	(129)
5.1.1	封闭断层模型	(130)
5.1.2	双对数曲线特征	(130)
5.1.3	压力和压力导数曲线的拟合方法	(130)

5.1.4	半对数解释	(130)
5.1.5	压力恢复解释	(131)
5.2	均质储层中两条平行封闭断层	(132)
5.2.1	平行封闭断层模型	(132)
5.2.2	线性流	(132)
5.2.3	双对数特征	(133)
5.2.4	压力和压力导数曲线的拟合方法	(133)
5.2.5	半对数解释	(134)
5.2.6	线性流分析	(134)
5.2.7	压力恢复解释	(135)
5.3	均质储层中两条交错封闭断层	(136)
5.3.1	交错封闭断层模型	(137)
5.3.2	双对数曲线特征	(137)
5.3.3	压力和压力导数曲线的拟合方法	(138)
5.3.4	半对数解释	(139)
5.3.5	压力恢复解释	(139)
5.3.6	油田实例	(140)
5.4	封闭均质储层	(140)
5.4.1	封闭储层模型	(141)
5.4.2	压降特征	(141)
5.4.3	压力和压力导数曲线的拟合方法	(142)
5.4.4	半对数解释	(143)
5.4.5	线性 and 半线性流解释	(143)
5.4.6	拟稳态分析	(144)
5.4.7	压力恢复分析	(144)
5.5	定压边界	(148)
5.5.1	单线性定压边界模型	(149)
5.5.2	压力特征	(149)
5.5.3	压降和压力恢复分析	(150)
5.6	连通断层	(150)
5.6.1	半渗透线性边界	(151)
5.6.2	有限导流断层	(153)
5.7	双孔介质储层中的边界效应	(156)
5.7.1	双孔介质储层中一条封闭断层, 拟稳态窜流	(157)
5.7.2	双孔介质储层中两条平行封闭断层, 不稳定窜流	(158)
5.7.3	矩形封闭双孔介质储层, 拟稳态窜流	(158)
5.7.4	矩形混合边界双孔介质储层, 拟稳态窜流	(159)
5.7.5	油田实例	(159)
5.8	双渗储层中的边界效应	(160)
5.8.1	双渗储层中一条封闭断层	(160)

5.8.2	双渗储层中两条平行封闭断层	(160)
5.8.3	双渗储层圆形封闭边界	(161)
5.8.4	油田实例	(162)
5.9	复合储层中的边界效应	(162)
5.9.1	线性复合槽状边界	(162)
5.9.2	复合储层中视边界效应	(164)
5.10	其他类型边界	(165)
5.10.1	槽状储层	(165)
5.10.2	复杂边界系统	(166)
5.10.3	气顶或底水驱的影响	(166)
5.11	结论	(167)
6	多井试井	(169)
6.1	均质储层中的干扰试井	(169)
6.1.1	压力及压力导数线源解	(169)
6.1.2	典型的干扰试井压力响应	(170)
6.1.3	井筒储集和表皮效应对干扰试井压力曲线的影响	(172)
6.1.4	干扰试井压力响应半对数分析	(174)
6.2	均质储层中干扰试井复杂化的影响因素	(174)
6.2.1	储层边界的影响	(174)
6.2.2	渗透率各向异性储层中的干扰试井	(175)
6.3	复合储层中的干扰试井	(176)
6.3.1	径向复合储层	(177)
6.3.2	线性复合储层	(180)
6.4	双孔介质储层中的干扰试井	(180)
6.4.1	拟稳态窜流典型压力曲线	(180)
6.4.2	拟稳态窜流双孔介质储层中的压力特征	(181)
6.4.3	拟稳态窜流双孔介质储层中干扰试井的压力和压力导数分析	(182)
6.4.4	拟稳态窜流和渗透率各向异性双孔介质储层中的干扰试井	(183)
6.4.5	不稳定窜流典型压力曲线	(183)
6.4.6	不稳定窜流双孔介质储层中干扰试井的压力和压力导数分析	(184)
6.5	多层储层中的干扰试井	(184)
6.6	脉冲试井	(186)
6.6.1	脉冲试井方法的优点和局限	(186)
6.6.2	脉冲试井分析	(187)
6.7	结论	(187)
7	气藏试井的应用	(189)
7.1	气井压力特征描述	(189)
7.1.1	天然气的压缩系数和黏度	(189)
7.1.2	拟压力	(189)
7.1.3	拟时间	(190)

7.2	气井不稳定试井解释方法	(190)
7.2.1	人工分析的简化拟压力	(190)
7.2.2	无量纲参数的定义	(191)
7.2.3	线性参数	(192)
7.2.4	非达西流	(193)
7.2.5	物质平衡修正	(194)
7.3	产能试井	(195)
7.3.1	产能方程	(195)
7.3.2	回压测试	(196)
7.3.3	等时试井	(196)
7.3.4	修正等时试井	(198)
7.4	油田实例	(198)
8	多相流试井	(200)
8.1	Perrine 方法	(200)
8.1.1	假设	(200)
8.1.2	定义	(200)
8.1.3	应用分析	(201)
8.1.4	Perrine 方法讨论	(201)
8.2	拟压力方法	(202)
8.2.1	溶解气驱油藏	(202)
8.2.2	凝析气藏	(203)
8.3	压力平方法	(203)
9	特殊测试	(205)
9.1	DST	(205)
9.1.1	测试描述	(205)
9.1.2	段塞测试分析	(206)
9.1.3	压力恢复分析	(207)
9.2	脉冲测试	(209)
9.2.1	脉冲测试简介	(209)
9.2.2	脉冲测试分析	(209)
9.2.3	脉冲分析讨论	(210)
9.2.4	不稳定源(流量)后的压力响应	(211)
9.3	定压测试和流量递减分析	(211)
9.3.1	径向均质储层响应	(211)
9.3.2	其他类型井和油藏特征	(212)
9.3.3	讨论	(215)
9.4	垂直干扰测试	(215)
9.4.1	测试描述	(215)
9.4.2	垂向干扰测试的压力响应	(216)
10	试井解释中应考虑的几个实际问题	(218)

10.1	试井解释复杂化的因素	(218)
10.1.1	数据准备和有效性检验	(218)
10.1.2	井和油藏条件对压力响应的影响	(225)
10.2	解释步骤	(228)
10.2.1	方法	(228)
10.2.2	诊断：典型的压力和压力导数曲线形状	(229)
10.2.3	利用历史模拟曲线进行一致性检验	(231)
10.3	井和油藏特征的描述—解释结果	(234)
10.3.1	解释模型	(234)
10.3.2	静态参数误差	(234)
10.3.3	关于压力剖面和探测半径的讨论	(235)
附录		(237)
附录1	常见的双对数压力特征曲线.....	(237)
附录2	实用公制单位系数换算及公式.....	(241)
符号说明		(254)
参考文献		(261)

1 不稳定试井原理

本章首先介绍试井及解释中常用的术语和各种试井方法，然后介绍井的压力特征及相关的解释方法。试井压力曲线在不同阶段具有不同的特征，而这种特征与井和储层的特性有关。第2章将详细介绍试井解释技术。

1.1 简介

1.1.1 试井概念

试井就是通过产量的瞬时变化产生不稳定压力响应。与油藏开采的整个周期相比，试井时间是非常短的。试井目的不同，试井持续时间也不同。对于评价试井，测试时间一般少于两天，而探边测试，时间可能持续几个月。

大多数情况下，试井的产量在地面进行计量，压力在井下记录。开井之前，原始地层压力 p_i 在储层中为常数并且各处相等。在流动阶段，压力降 Δp 由下式定义：

$$\Delta p = p_i - p(t) \quad (1.1)$$

关井时，压力恢复变化 Δp 从关井前的流动压力 p ($\Delta t = 0$) 估算：

$$\Delta p = p(t) - p(\Delta t = 0) \quad (1.2)$$

通过压力响应与开井或关井后的时间 Δt 来进行压力分析（图 1.1）。

(1) 试井目的。

试井分析结果提供了有关储层和井的信息。综合应用地质、地球物理和岩石物理资料和试井资料可以建立储层模型，对不同开发条件下的油田动态和采收率进行预测。通过试井分析可以确定井和储层之间的连通程度，从而对能否提高井产能做出合理判断。

试井目的可以归结为以下几个方面：

探井：探井试井用来证实勘探假设和建立初始的生产预测，确定流体性质和产量、原始地层压力以及井和储层的特征。试井方法可能仅局限于中途试井（DST）。

评价井：通过评价井试井可以修正先前的井和储层描述，进一步验证井的产能、储层非均质性、边界和驱动机理等。井底流体取样用于 PVT 实验室分析。通常进行的是较长时间的测试（生产试井）。

开发井：在生产井进行周期试井，以细化储层描述并确定井是否需要采取措施，例如修井、补孔或重新完井，使井的生命周期最长。确定井之间的连通性（干扰试井）以及平均地层压力的连续监测也是开发试井的目的之一。

(2) 试井得到的资料。

试井响应反映了流体通过储层和井的能力。与地质和测井资料不同，试井是在动态条

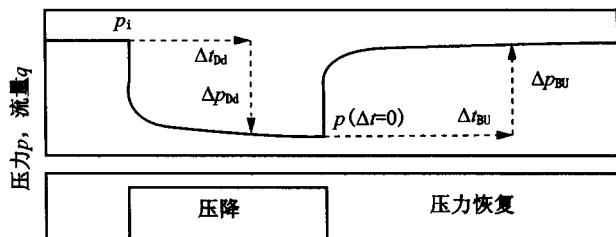


图 1.1 压降及压力恢复试井

件下获得储层和井的参数。由于测试影响的储层体积相对较大，所以估计得到的参数是储层的平均值。根据压力曲线解释可以得到下列资料：

储层描述：

- ① 渗透率（水平渗透率 K 和垂向渗透率 K_v ）；
- ② 储层非均质性（天然裂缝、多层、储层性质横向变化）；
- ③ 边界（距离、大小和形状）；
- ④ 压力（原始地层压力 p_i 和平均地层压力值 $\bar{p}$ ）。

井描述：

- ⑤ 生产潜力（产能指数 PI 和表皮系数 S ）；
- ⑥ 井的几何参数。

对比定期的试井结果，可以得到井产能和平均储层压降变化率资料。

(3) 试井类型。

压降试井：用井底流压资料进行试井分析。理想情况下，井以定产量生产，但实际上井的生产很难达到定产量的条件，所以压降资料误差比较大，很难进行准确的试井分析。

压力恢复试井：用关井后压力恢复资料来进行分析。在关井恢复试井之前，井必须生产足够长的时间，以达到稳定产量。由于关井恢复期间流量可以准确控制（产量为零），所以经常应用恢复资料进行试井解释。

注入井试井和注入井压力降低试井：当流体注入储层时，井底流压升高；关井后，压力下降。一般注入流体的性质与储层流体的性质不同。注入井和注入井压力降低试井解释比生产井试井需要注意更多细节。

干扰试井和脉冲试井：在距生产井一定距离的观察井中连续监测井底流压。干扰试井主要用于评价井间的连通性。脉冲试井是在激动井中进行一系列短时间的开井生产/关井恢复操作，在观察井中采集相应的压力变化资料进行解释。

气井试井：该方法用来评价气井的产能（绝对无阻流量，AOFP）和可能的非达西流（流量与表皮系数 S 有关）。通常采用的方法是回压试井、等时试井和修正等时试井。

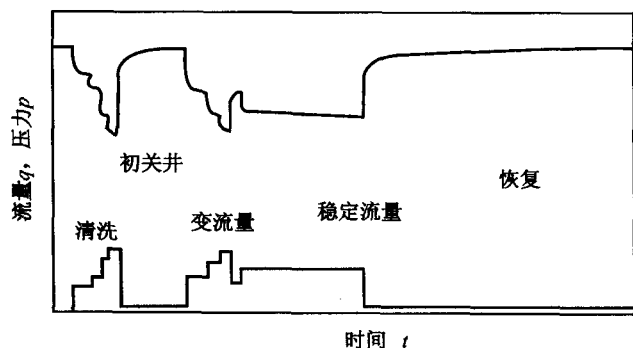


图 1.2 油井典型测试程序

图 1.2 是典型的探井油井测试程序。首先以不同的产量生产进行排液，直到地面产出的流体为储层流体。然后关井下压力计测量井底压力，再开井进行主流动生产。流量由节流管汇的计量孔板控制。通常采用不同尺寸的油嘴进行生产，求得稳定生产的条件。在定产量生产一段时间后，关井进行最终的恢复试井。

(4) 完井。

生产测试：进行这种测试时，井已下套管并下入永久性的完井设备，

通常是在井口进行压力监测。

中途试井（DST）：用井下关井阀进行临时完井。一般情况下，在套管井中测试，但也可在裸眼井进行 DST 测试。在测试期间，采用井底关井方式关井。中途试井通常时间较

短, 在不能使用钻柱(钻杆)时, 可应用生产油管进行测试。

1.1.2 试井解释方法

(1) 反问题。

试井解释的目的是通过非直接测量(对应产量变化 I 产生压力响应 O) 对一个未知系统 S (井 + 储层) 进行描述, 如图 1.3。求解 $S = O/I$ 是一个典型的反问题 (Gringarten 等, 1979)。

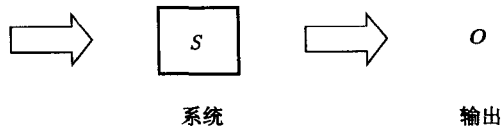


图 1.3 输入输出系统图

与正问题 ($O = I \times S$) 相反, 反问题的解通常并不惟一。这表明求解反问题存在一个系统识别过程, 并且解释模型特征要与实际储层特征一致。

(2) 解释模型。

试井解释中使用的模型可以描述为一个转换函数, 模型仅定义系统的特性 (均质或非均质, 有边界或无限大)。由于反映的是储层平均特征值, 试井解释模型经常与地质模型或测井模型不同, 例如在试井中, 地质模型中的多层经常表现出均质储层的特征。

解释模型由几个相对独立部分组成, 不同时间的压力响应表现为不同的特征。一旦识别出所有部分的压力特征, 就可以定义解释模型。模型解析解或数值解用来产生相对于井某一产量史 I 的压力响应, 对模型参数进行调整直到模型的压力响应 O 与系统 S 的实际压力响应一致。

对复杂储层特征, 测试中的压力响应可以用不同模型描述。反问题多解性可用其他资料, 如利用地质和地球物理资料减少解的不确定性。某些情况下, 可能需要设计一个新的测试来完善或改进有异议的压力响应资料。

(3) 试井分析需要的输入资料。

测试数据: 记录对应测试时间的流量和井底压力。测试过程必须记录详细, 任何影响井压力响应的操作问题必须详细描述。解释结果的可靠性取决于试井数据的准确性。当某些流动期的流量未进行计量时, 必须进行准确估算。流量或压力数据可能产生的误差将在第 10 章加以讨论。

井资料: 井筒半径 r_w , 井几何参数 (比如斜井或水平井), 深度 (地层, 尺寸)。

储层和流体参数: 地层厚度 h (净), 孔隙度 ϕ , 原油压缩系数 C_o , 地层水压缩系数 C_w , 地层压缩系数 C_t , 含水饱和度 S_w , 原油黏度 μ , 地层体积系数 B 。系统总压缩系数 C_t 可以表示为:

$$C_t = C_o(1 - S_w) + C_w S_w + C_t \quad (1.3)$$

上面的地层和流体参数可用来计算结果。在初步解释后和解释模型不变的前提下, 为得到更准确的解释结果, 可能需要对上述参数做一些调整。

在某些情况下, 生产测井、压力梯度测量、储层温度以及泡点压力等资料对解释是很有用的。为了使试井解释结果可靠, 还需要从地质学者和地球物理学者那里得到沉积和构造的一些资料。

1.2 典型流态

1.2.1 流态的类型

通常根据压力随时间的变化规律进行流动状态分类。

(1) 稳态流。

在稳定流中, 压力不随时间变化。这种情况可在定压条件下观察到, 如气顶或强水驱。在这种情况下, 压力及时补充, 保证了开采过程中地层压力恒定。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (1.4)$$

(2) 拟稳态流。

拟稳态描述了一个封闭系统的压力变化: 以定流量生产时, 单位时间内压力降为常数。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \text{常数} \quad (1.5)$$

(3) 不稳定流。

在井受到定压或封闭边界影响之前可以观察到不稳定流态。压力随时间的变化是井几何参数和储层特性的函数, 例如地层渗透率和非均质性。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = f(x, y, z, t) \quad (1.6)$$

通常, 试井解释主要是处理不稳定流动压力资料。在试井过程中, 首先出现近井压力响应, 随着泄油面积扩展, 出现储层特征压力响应, 最后边界影响出现 (流态变化为拟稳态或稳态)。后面我们将介绍几种井流态的特征实例来说明典型的试井压力响应。

1.2.2 井筒储集

最初开井时, 地面产量源于储集在井筒中流体的膨胀, 储层几乎无贡献。这种现象称为纯井筒储集效应。这种效应可以持续几秒到几分钟。随后储层开始产出流体, 砂面流量增加。在砂面流量与地面流量一致时, 井筒储集效应对井底压力变化不再产生影响, 测试压力资料描述了储层的特征, 可用于不稳定试井解释。

关井期间井筒储集效应称为续流。在关井后, 油层继续生产, 井筒中储集的流体再次受到压缩。可以观测到3种不同的压力特征: 纯井筒储集效应期、砂面流量递减时的过渡期和砂面流量最终为零时井筒储集效应结束期。

井中流态发生任何变化, 在地面产量和油层产量之间都会存在一个时间滞后。井筒储集效应在每一流动期的开始都会影响井的压力变化。本章只举例说明压降期的压力特征, 第2章将讨论变流量和关井期井筒储集效应的压力特征。

(1) 井筒储集系数。

井筒储集系数定义了纯井筒储集流动期间压力变化的速率。对于一个充满单相流体的井, 井筒储集系数可用流体压缩系数来表示 (Van Everdingen 和 Hurst, 1949):

$$C = - \frac{\Delta V}{\Delta p} = C_o V_w \quad (1.7)$$

式中 C_o ——流体压缩系数;

V_w ——井筒容积, bbl。

在井未充满液体而存在液面变化时 (Earlougher, 1977), 液面深度与流量相关 (见图1.4), 关系式为 $\Delta V = V_u \Delta h$ 。井底压力变化可表示为: $\Delta p = \rho \Delta h$ (g/g_c), 其中 ρ 是流体密度 (lb/ft³), g/g_c 是重力加速度 (lbf/lb), V_u 是单位长度井筒容积 (bbl/ft)。

$$C = 144 \frac{V_u}{\rho(g/g_c)} \quad (1.8)$$

(2) 特征分析。

在纯井筒储集期，井筒的作用类似一个封闭体。当地面流量一定时，压力随时间成线性变化。由压力变化 Δp 对时间 Δt 的线性关系曲线可估算井筒储集系数（van Everdingen 和 Hurst, 1949）。早期，关系曲线是直线，斜率 m_{WBS} ，通过原点 $(0, 0)$ （见图 1.5）。

$$\Delta p = \frac{qB}{24C} \Delta t \quad (1.9)$$

井筒储集系数 C 可由直线斜率 m_{WBS} 估算：

$$C = \frac{qB}{24m_{\text{WBS}}} \quad (1.10)$$

1.2.3 径向流表皮系数（均质储层）

当储层进行生产时，流线以径向几何形状向井收敛（图 1.6）。在储层中，压力是时间和距井距离的函数。当生产时间增大时，井底压力 p_{wf} 降落，半径为 r_i 的圆形泄油面积在储层中扩展。研究半径 r_i 将在本章的后面部分讨论。

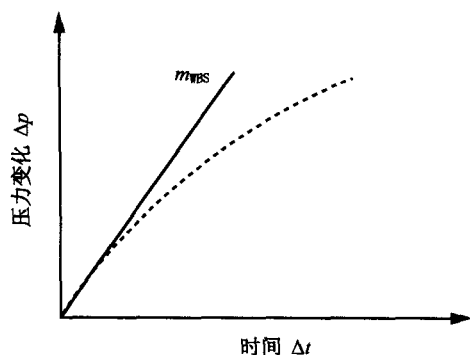


图 1.5 井筒储集效应的线性特征分析

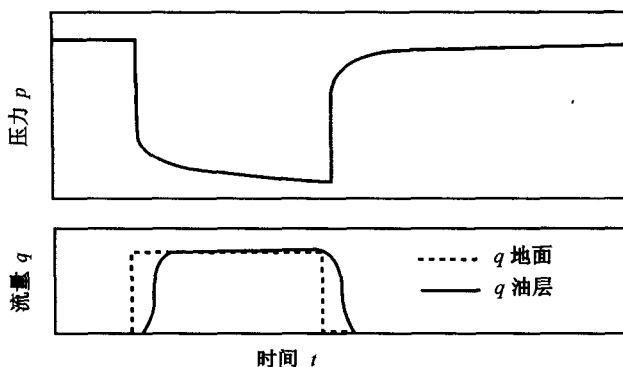


图 1.4 井筒储集对油层和地面流量的影响

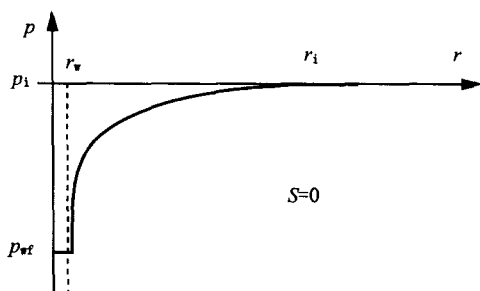


图 1.6 径向流压力剖面
表皮系数为 0

(1) 表皮系数。

对于有地层伤害的井，储层和井筒之间存在流动阻力，流体进入井筒时产生了一个附加压力降 $\Delta p_{\text{表皮}}$ （图 1.7）。对于措施井，近井地带的流动状况得到提高，在近井筒储层的圆柱区域压力降减小（图 1.8）。

为了进行井间对比，压力降的幅度需要标准化。同一 $\Delta p_{\text{表皮}}$ 可以描述较低或非常大的地层伤害，这取决于流量和储层渗透率。表皮系数 S 是一个无量纲参数（van Everdingen 1953），它描述了井的状况：对于伤害井， $S > 0$ ；对于激励井， $S < 0$ 。

$$S = \frac{Kh}{141.2qB\mu} \Delta p_{\text{表皮}} \quad (1.11)$$

地层伤害井（ $S > 0$ ）的典型例子是井和储层之间连通性差（泥饼、射孔密度低、部分