

# 注水井试井方法综述

刘曰武\*

刘俊丽

(中国科学院力学所基础室) (中国科学院渗流所)

刘振庆

(华北石油油气井测试公司)

**摘要** 根据国内外注水井的研究资料和对注水井测试资料的实际分析,对注水井的测试方法、理论发展、分析解释方法进行了综合分析论述,说明了注水井试井解释应得到的主要结果,指出了注水井试井工作的意义和今后的发展趋势。

**主题词** 注水井 试井 分析方法 综述

## 概 述

为了提高原油采收率,在世界范围内,大多数的油田均采用注水开发。注水开发的不同时期,地下流体的分布大大不同。开发初期,由于油水特征的差别,在井周围形成油水混合区,而在远离井的区域则是未侵入区。随后,在井周围形成一个高渗水区,而在远离井的区域仍是未侵入区,在两区之间存在一个油水过渡带。开发中期,采油井见水后,未侵入区将消失。所以在油田注水井试井和进行试井资料解释时,应对所处理井慎重考虑。

## 测 试 方 法

注水井的试井目的除了与生产井试井一样可以确定近井带地层的伤害程度、地层渗透率、平均地层压力和地层的非均质性质以外,还可以确定注水井周围流体的饱和度,监测流体界面的运动和确定注水井的注入能力,判断注采系统是否合理以及注入水的主要走向等。注水井测试常用的方法有:注入能力测试;压力衰减测试;注水井系统测试;注水井干扰测试。

### 1. 注水井系统测试

注水井系统测试特别用来确定地层岩石产生裂缝时的破裂压力。在测试过程中,每次流量递减之前以一定的注入速度注水 30 min,然后再使其保持 30 min。用每个注入流量结束时观测到的压力与注入流量分别作图(这种图经常出现两条直线),其交点就是地层的破裂压力。

### 2. 注入能力测试

在注入能力测试中,压力达到稳定之前注水井一直是关着的,只有在记录压力时注水井才开始以稳定注入速度注入。由于注入水的密度与油藏流体的密度不同,当油藏岩石所期望的描

\* 刘曰武:男,博士后,1988年毕业于大庆石油学院,1997年毕业于中科院渗流所,获博士学位,主要从事渗流力学基础理论研究,油气井测试理论和资料解释工作。地址:北京市海淀区中关村路15号,邮政编码:100080。

述参数各向同性时,注入剖面(吸水剖面)是不均衡的。当注入水的密度大于油藏流体的密度时,注入水会趋向沉聚于油藏流体之下,反之,则超覆于油藏流体之上。因此用于解释注入能力测试的地层有效厚度,不同于解释压降测试所用的有效地层厚度。如果注入水粘度、压缩性和润湿性都与油藏流体不同,在油藏中的注入水和油藏流体之间就会形成一个界面或前缘,并且对每种流体的渗透率将决定于其饱和度。这意味着相对渗透率将起重大作用。

### 3. 压力衰减测试

压力衰减测试通常是在较长时间的注入能力测试之后进行的,记录压力时注入停止。当注入水和油藏流体性质一致时,与压力恢复测试是相同的。某些衰减测试中,井口的压降低于大气压力。这种情况发生时,油管将部分变空,这就意味着井储系数是变化的。为了避免这种情况的发生,必须使用井底关井设备或采用两个流量的衰减测试。当注入水和油藏流体性质差别不大时,两个流量的衰减测试与生产井的多流量测试的解释方法是一致的。当注入水和油藏流体性质差别较大且注入水已经充满了注水井周围的一个基本区域时,短时注入之后的衰减测试或两个流量的衰减测试就可以用生产井的压力恢复多流量测试完全相同的方法进行解释。

### 4. 注水井干扰测试

(1)水井做激动井,油井做测试井。一般的方法是在注水井上做一定量的注入量激动,从生产井上测量压力的相应变化,从而确定井间连通、生产井的来流方向、地层流动系数等方面的资料;(2)油井做激动井,水井做测试井。在生产井上做一定的产量激动,从注水井上测量压力的相应变化,从而确定井间连通、注水井水流方向、地层流动系数等方面的资料。这种方法较前者更为经济实惠,但在实施上应考虑较多问题。

## 理 论 发 展

由于注入解释固有的困难,注水井试井一般只研究含有定常特性流体的单层均质油藏,且假设在注入之前整个地层的原始压力和流体饱和度都是常数,并完全贯穿地层,注入压力分布均匀,不受注入水和油藏流体之间矛盾的影响。现在所讨论的注水井测试模型大多数都是建立在 Buckley-Leverett<sup>[1]</sup>(1942 年)提出的驱替模型和 Wagle<sup>[2]</sup>(1952 年)给出的前缘推进解基础之上的。

### 1. Hazebroek, Rainbow, Matthews<sup>[3]</sup>(1958 年)的模型

基本假设:扩散方程对各个区域都有效;饱和度在各个区域的边界上呈阶跃式变化;压力的分布在关井之前趋于稳定;前缘的压力是定常的;前缘在整个测试过程中是稳定的。

该模型的解为压力衰减测试的一个解析解,只能在流度比为 1 的情况下解释井筒存储。这一模型和解释方法 1967 年 Matthews 和 Russell<sup>[4]</sup>的文章中已用实例做了详细说明。

### 2. Kazemi, Merrill, Jargon<sup>[5]</sup>(1972 年)的模型

该模型是注水井压力衰减测试的一个数值模拟模型。对每一个区域做了以下假设:扩散方程对各个区域都有效;饱和度在各个区域是定常的且在边界上呈阶跃式变化;压力的分布在关井之前趋于稳定;前缘的压力是定常的,在整个测试过程中油水前缘是稳定的。

通过研究他们获得了以下结论:(1) 尽管在整个测试过程中油水前缘是不稳定的,但是 Horner 或 MDH 图仍然可以用来解释压力衰减测试的资料。这使得在测试过程中前缘的推进

速度减小了;(2) 如果侵入区的宽度相当大,那么在 Horner 或 MDH 图上将出现三个或者两个直线段。如果没有井筒存储的影响,第一直线段的斜率将给出水区的传导系数。如果存在井筒存储的影响,第一直线段的数据可以用压力恢复曲线的双对数拟合法进行同样的解释。然而,如果在测试过程中井筒出现负压,第一直线段的数据就不能进行解释;(3) 如果水区的储能系数和侵入区的储能系数相同,并且油水前缘的径向距离大于侵入区径向距离十倍以上,那么第一直线段的斜率将正比于侵入区的传导系数;(4) 如果由矿场测试数据计算所得的井筒存储常数超出了系统的物理真实性,那么压力衰减测试的资料是不能解释的。

### 3. Merrill, Kazemi, Gogarty<sup>[6]</sup>(1974年)的模型

该模型是注水井在两区或三区系统的压力衰减测试理论模型,是以 1972 年 Kazemi 等人提出的模型为基础的。一般情况下,对气驱用两区模型研究,对液体驱动主要研究流度比远小于 1 的情况。其理论曲线可分为四部分:井筒存储系数控制段;驱替流体影响段;驱替流体与被驱替流体综合影响段;未侵入区的性质所控制段。

根据计算机运行的结果, Merril 等人得出了以下的结论:(1) 如果两区的储能比  $(\varphi C_t)_1/(\varphi C_t)_2=1$ , 那么直线的斜率比  $m_2/m_1$  将等于流度比  $\lambda_1/\lambda_2$ 。如果两区的储能比  $(\varphi C_t)_1/(\varphi C_t)_2$  不等于 1, 那么流度比  $\lambda_1/\lambda_2$  将由 Merril 等人给出的图确定;(2) 如果两区的储能比  $(\varphi C_t)_1/(\varphi C_t)_2$  可以估算, 并且 Horner 或 MDH 图上的直线斜率和两直线的交点可以确定, 那么将可以计算油水前缘的位置;(3) 对三区油藏, 第一区的流度可以通过第一直线段的斜率确定, 要确定油水前缘的位置是相当困难的。

### 4. Sosa, Ragahavan, Limon<sup>[7]</sup>(1981年)的模型

该模型是根据 Buckley-Leveret 的驱替理论形成压力衰减测试的数值模拟模型, 并且将压力衰减测试限制在流体一流体驱替的研究范围内。研究了不同流度比的情况, 包括流度大于 1、等于 1 和小于 1 的情况。该模型比以前的模型更能证明压力衰减测试问题的物理图象。

在该模型的基础上, Sosa 等人得到了与以前模型相对立的结论。例如: 不能从压力衰减测试资料得到油气前缘的距离; Horner 或 MDH 图上出现两个或三个直线段, 只依赖于流度比和关井时间的长短。它与以前模型最根本的相同点是第一直线的斜率正比于水区的传导系数。

### 5. Abbaszadeh, Kamal<sup>[8]</sup>(1989年)的模型

该模型的贡献在于给出了压力衰减测试问题的 Laplace 空间的复合油藏形式的解。如果不考虑其结果在实际中是否方便, 该模型的半解析解在发展复合油藏的处理方法上将获得巨大的成功。

最初, Abbaszadeh 和 Kamal 致力于研究具有不同饱和度、粘度和综合压缩系数, 但渗透率、孔隙度和厚度相同的两区油藏的压力衰减测试问题, 然后拓展到本区饱和度相同但邻区饱和度不同的多区系统中。

该方法用压力衰减测试资料和典型曲线拟合得到: 表皮系数; 水区半径; 水驱前缘距离; 水区有效渗透率; 油区的有效渗透率; 未侵入区的原始束缚水饱和度; 平均地层压力(由 Horner 图上初始直线外推到 Horner 时间为 1 时得到); 流度分布函数; 相渗分布函数; 压力分布函数。

## 解 释 方 法

注水井试井分析的难点在于: 多层、变厚度、变井储、流度为分布函数、压力为分布函数以

及相渗为分布函数。注水井的试井资料解释方法一般分为三类:

### 1. 常规分析方法

主要包括:Horner 分析方法和 MDH 方法以及其它派生的直线分析方法。这些方法与生产井的试井分析没有本质区别。

### 2. 典型曲线拟合法

注水井的典型曲线拟合方法与生产井的试井分析的区别主要在于所选择的解释模型本身和具体分析步骤的差别。注水井的典型曲线拟合法,除了计算近井带地层的伤害程度、地层渗透率、平均地层压力和地层的非均质外,还可以确定注水井周围流体的饱和度,监测流体界面的运动和确定注水井的注入能力等。

### 3. 油藏模拟器方法

在以前的文章中讨论的所有解释方法都是依复合油藏的边值问题的解析解或数值解为基础的。然而,Yeh 和 Agarwal<sup>[9]</sup>(1989)为压力衰减测试问题提出了一种完全不同的方法。即通过使用油藏模拟器研究压力衰减测试。他们模拟了大量的压力衰减测试问题,检测结果和实际观察的结果是一致的。

Yeh 和 Agarwal 得到的结论是:(1)在双对数的压力导数和时间图上,可以看到常斜率的直线段。利用这时的压力导数值可以求得水区总的流度和表皮因子;(2)在无井筒存储影响的条件下,如果注入时间和关井时间相当长,则可以得到水区总的流度与距离的关系、相对渗透率与距离的关系;(3)利用所获得的测试资料可以确定水区半径和水驱前缘的位置;(4)通过分析可以得到注水井周围的压力分布。

Yeh 和 Agarwal 给出的方法在计算合理的压力导数的方法上尚存在一定的问题,但可以通过一定的方式解决。Yeh 和 Agarwal 给出的方法不需要相对渗透率的经验知识且非常深入。由此方法导出地层相对渗透率值,是理所当然的。

## 发 展 趋 势

### 1. 注水井试井的意义

综合注水井的测试、理论解释以及所得到的分析结果,可以看出注水井试井的意义:(1)在不影响或极小影响油井产量的条件下,可以得到油井试井的几乎所有参数,这些参数包括地层渗透率、地层平均压力、地层的性质和非均质程度、近井带的污染等;(2)注水井试井除了得到生产井所能得到的参数外,还可以得到流体在地层中的分布函数、压力分布函数、渗透率分布函数,对注采系统的调整有积极的意义;(3)可以了解地层压力情况,判断注水是否合理、地下有无亏空,为合理有效注入提供有力依据;(4)通过注水井试井资料的分析和非均质情况的验证,从平面上判定残余油可能存在的位置以及残余油的主要存在方式;(5)根据地层的非均质情况判断水流方向,可对注入井网中各井的注入强度进行调整;(6)由于注水井测试造成的注入量减少可在短时间内补足,因此可在注水井上进行长时间的探边测试或大范围的流体分布测试。

### 2. 发展趋势

综合分析国内外研究的情况,注水井试井的发展趋势是:(1)从活塞式驱替逐步发展为非

活塞式驱替;(2)理论模型纵向上由单层发展到了多层,横向上由两区或三区发展到多区;(3)由复合油藏理论逐步发展为考虑流体分布的模拟器理论;(4)由单井测试逐步发展为多井及井组的测试;(5)分析结果由原来的各个单项参数逐步发展为参数组合或函数关系;(6)分析结果的应用从单井发展到指导区块油田的开发调整。

## 结论及建议

1. 本文给出了注水井测试的几种主要方法,在实际应用时必须针对不同目的合理选择;
2. 文中所述的注水井解释模型的选择必须结合油田的实际开发过程和地质情况;
3. 注水井试井的三种分析方法在使用过程中可以相互配合使用;
4. 用注水井测试替代或辅助生产井测试将会对油田经济效益的提高起积极作用。

**编者按:**这里仅一般性地回顾和综述了注水井试井问题。但是由于现有可获得的技术和方法都是依众多的假设条件而不是完全符合实际的油藏,因此,对于注水井的试井问题还需进行深入研究。有观点认为,注水井测试的分析问题非常复杂,必须借助数值模拟的方法。这或许是解决问题的一个办法。

## 参 考 文 献

1. Buckley, S. E. and Leverett, M. C. : Mechanisms of Fluid Displacement in Sand, *Tans. AIME* (1942) 146~149.
2. Wegle, H. J. : A Simplified Method for Computing Oil Recoveries by Gas or Water Drive, *Tans. AIME* (1952) 91~98.
3. Hazebroek, P., Rainbow, H. Jr. and Matthews, C. S. : Pressure Falloff in Water Injection Wells, *Tans. AIME* (1958) 250~260.
4. Matthews, C. S. and Russell, D. G. : Pressure Buildup and Flow Test in Wells, *SPE* (1967) 72~83.
5. Kazemi, H., Merrill, L. S. and Jargon, J. R. : Problems in Interpretation of Pressure Falloff Tests in Reservoir with and without Fluid Banks, *Jour. Pet. Tech* (Sept., 1972) 1147~1156.
6. Merrill, L. S., Kazemi, H. and Cogarty, W. B. : Pressure Falloff Analysis in Reservoir with Fluid Banks, *Jour. Pet. Tech* (July., 1974) 809~818.
7. Sosa, A., Raghavan, R. and Limon, T. J. : Effects of Relative Permeability and Mobility on Pressure Falloff Tests, *Jour. Pet. Tech* (June., 1981) 1125~1135.
8. Abbaszadeh, M. and Kamal, M. M. : Pressure Transient Testing of Water Injection Wells, *SPE* (Feb., 1989) 115~124.
9. Yeh, N. S. and Agarwal, R. G. : Pressure Transient Analysis of Injection Wells in Reservoir with Multiple Fluid Banks, *SPE* 19775 (Oct., 1989) 8~11.
10. Willhite, G. P. : Waterflooding, *SPE* (1986) 59~69.
11. 试井手册编写组:试井手册(下),石油工业出版社(北京),1992.
12. Earlougher, R. C. : *Advance in Well Test Analysis*, 1977.
13. Sabet, M. A. : *Well Test Analysis*, (1991) 371~389.
14. Ovens, J. and Niko, H. : A New Model for Well Testing in Water Injection Wells Under Fracturing Condition, 1994.

本文收稿日期:1997-03-16

along the major axis of the anticline, Dafangshen reservoir is defined as sand fracture hydrocarbon reservoir. The distribution and development control the oil enrichment.

**Subject heading:** well testing, fracture, fractured pool, dip

**Using Well Test Data to Evaluate Productivity of Gu13 Block.** 1998(1)7:54~58

*Jiang Hongcai (Well Testing Department, Jilin Petroleum Group Ltd.), Wang Yang (Research Institute of Jilin Petroleum Group Ltd.)*

Using a large number of well test data, a detailed study on the productivity of Gu13 block was made. A oil flow productivity equation was created, the absolute open flow and decline law of oil well was defined. At the same time, the economic evaluation was made using static evaluation approach, which will provide reference basis for oil field development.

**Subject heading:** pressure buildup analysis, static analysis, productivity evaluation, economic evaluation, formation pressure coefficient, fracturing

#### • Stimulation •

**Development and Application for the New Kind of Special Operation Technology in Talimu Oil Field.** 1998(1)7:59~63

*Long Ziqian, Fu Wanchun (Downhole Operation Company of Tuha Oil Field)*

Almost of the reservoirs in Tuha oil field are belong to "Three Low Character" reservoirs. There are much more troubles in the process of exploration and development. The new kind of special operation technology in Talimu oil field include nitrogen flowing back, continue tubing flushing, nitrogen displacement, combination gas fracturing, air cushion test, nitrogen positive perforating, etc. These technologies are based on the special operation equipment such as continue tubing car, liquid nitrogen pump car and making nitrogen truck. These new kinds of special technologies can solve many kinds of real problems.

**Subject heading:** Tulufan basin, liquid nitrogen truck, flushing, discharge fluid, fracturing, perforation, testing

**Sand Fracturing Technology by Layering and Selecting Layers.** 1998(1)7:64~66

*Tan Mingwen, Liu Shengxian (Well Testing Center of Xinan Petroleum Administration Bureau)*

In the sand fracturing process, multilayer fracturing problem is often meet. Traditional method is fracturing layer by layer, this need to spend a long time, lot of money, damage the formation many times and have low safty. Laying and selecting layers fracturing can be performed by using tubing string and through ball to control layering and selecting. The oil field application provided that this kind of technology is benifit in oil field.

**Subject heading:** separate layer fracturing, selective fracturing, technology design

#### • Comprehensive Discussion •

**Overview of the Well Testing Method for Injection Wells.** 1998(1)7:69~74

*Liu Yuewu (Institute of Mechanic of CNPC and Academia Sinica), Liu Junli (Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics CNPC and Academia Sinica), Liu Zhenqing (Well Testing Company of Huabei Oil Field)*

According to the published literature and the study of the authors, this article reviewed the testing and analyzing method for injection wells, and its theory developing history, declared the main results of the interpretation, pointed out the significance of testing injection well and tend of development.

**Subject heading:** water injection well, well testing, analytical method, review