

注水井压降试井分析方法及其应用

姚 军 李爱芬 李桂江

(石油大学开发系, 山东东营 257062) (大港油田采油三厂)

摘要 注水井不稳定试井问题属于油水两相渗流问题, 建立了能够描述水驱过程的注水井试井解释模型, 利用 Buckley-leverett 驱油方程可确定任意时刻的油水饱和度分布, 代入差分方程可快速计算压力分布. 根据关井时刻的压力和油水饱和度分布可以计算出关井后注水井的压力降. 该压降涉及油水相对渗透率、注水时间、污染系数和井筒储存系数等因素. 研制了一套实用的注水井压力降试井典型图版. 简要介绍了根据上述理论编制的注水井压降试井分析软件的功能和特点. 最后给出了应用本软件处理的实际例子.

主题词 注水井; 试井; 压力降; 数值计算

中图法分类号 TE 353.2

第一作者简介 姚军, 男, 1964年出生, 讲师. 1990年研究生毕业于石油大学(北京). 现在开发系从事油藏工程的教学和科研工作.

0 引言

注水作为一种提高原油采收率的有效方法, 在世界范围内得到了广泛的应用. 注水井在注水开发中起着相当重要的作用, 利用注水井试井评价油藏动态、监控注水过程具有重要意义. 注水井试井具有很多优点: 工艺简单、测试方便、不影响油井产量, 尤其是在高粘油田中油井难以进行测试, 只有通过注水井来了解油层动态. 从理论上讲, 注水井试井问题属非线性两相渗流问题, 本文通过简便的数值差分及 Buckley-leverett 驱替方程求解注水井试井模型, 避开应用叠加原理, 提高了计算速度和精度.

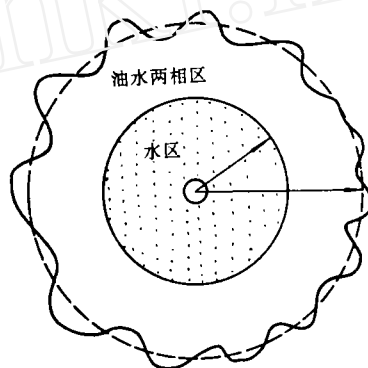


图1 注水井/油藏系统物理模型

1 注水井试井解释模型及求解方法

1.1 注水井试井解释模型

油藏注水后, 由于油水性质的差异在油藏内很快形成了流体的饱和度梯度, 井周围形成了高含水区域, 向外水的饱和度逐渐减小, 而注水前缘以外是具有原始流体饱和度的油区. 不同的注水时刻, 油水两相区的大小及其饱和度分布不同. 注水油藏注水井试井的物理模型见图1.

对于图1的物理模型作如下假设: 油藏岩石为均质各向同性介质, 地层厚度 h 不变; 流体微

收稿时间: 1994-03-26

• 8 •

可压缩,其油水压缩系数分别为 C_o 和 C_w ,岩石的孔隙度为 φ ;流体在地层中的流动属于等温流动而且忽略重力和毛细管力的影响.在模型中,内区是一个油水两相混流的区域,该区域内每一半径处的饱和度、流度和压缩系数都不相同.

不同的注水时间,模型中两相区的大小不一样,饱和度分布和压力分布亦不一样.因此欲求关井后注水井的压力降必须先求出关井时刻的压力分布和饱和度分布.在此基础上才能求解关井后的压力降.

1.2 注水阶段的数学模型及求解方法

注水阶段的数学模型应为油水两相流的数学模型.这里应用 C. S. Matthews^[7]提到的综合方程,并以无因次形式给出

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial P_D}{\partial r_D} \right) = F_v \frac{\partial P_D}{\partial t_D} \quad (1)$$

$$\text{初始条件: } P_D(r_D, 0) = 0 \quad (2)$$

$$\text{内边界条件: } \left. \frac{\partial P_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = -1 \quad (3)$$

$$P_{WD} = [P_D - S \frac{P_D}{r_D}]_{r_D=1}$$

$$\text{外边界条件: } P_D(r_{eD}, t_D) = 0 \quad (\text{常压}) \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial P_D(r_D, t_D)}{\partial r_D} \right|_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (\text{封闭}) \quad (5)$$

$$\text{其中, } P_D = K_w h \Delta p / (1.842 \times 10^{-3} q \mu_w B_w) \quad (6)$$

$$t_D = 3.6 K_w t / (\varphi \mu_w C_i r_w^2) \quad (7)$$

$$r_D = r / r_w \quad (8)$$

$$F_v = (K / \varphi \mu C_i)_i / (K / \varphi \mu C_i)_r \quad (9)$$

$$(K / \varphi \mu C_i)_r = (K_w / \varphi \mu_w C_w)_r + (K_o / \varphi \mu_o C_o)_r \quad (10)$$

式中, q 为注水井日注水量, m^3/d ; K_w 为残余油下的水相渗透率, mD ; C_i 为油、水和岩石的综合压缩系数, $1/\text{MPa}$; r_w 为注水井半径, m ; φ 为地层的有效孔隙度, 小数; C_o 和 C_w 分别为油水的压缩系数, $1/\text{MPa}$; μ_o 和 μ_w 为油水的粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; Δp 为任意时刻的地层压力与原始地层压力之差, MPa .

上述数学模型中,无饱和度方程,应用 Buckley—Leverett 方程可求解注水任意时刻油水两相区的大小及两相区内的饱和度分布.其方程为:

$$r^2(t) = - \frac{qt/24}{\pi q h} f'_{w_e} \bigg|_{s_w} \quad (11)$$

式中, $r(t)$ 为 s_w 的等饱和度面距井的距离, m ; t 为任意注水时间, h ; f'_{w_e} 为分流曲线上 s_w 对应的曲线斜率, $f'_{w_e} = \frac{\partial f_w}{\partial s_w}$.

计算出任意时刻两相区内的饱和度分布,利用该油层的相对渗透率曲线和其它基本参数则可计算两相区内的其它参数.

采用不均匀差分网格系统和相应的变系数隐式差分格式,可将式(1~5)差分离散为

$$\left(r_{ln+1/2} \frac{P_{ln+1} - P_{ln}}{\Delta r_{ln+1}} - r_{ln-1/2} \frac{P_{ln} - P_{ln-1}}{\Delta r_{ln}} \right) (r_{ln+1/2} - r_{ln-1/2})^{-1} = F_{v,j} \frac{P_{ln} - P_{ln-1}^{i-1}}{\Delta t_j} \quad (12)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N - 1; j = 1, 2, \dots)$$

$$r_{ln+1/2} = 2r_{ln}r_{ln+1} / (r_{ln} + r_{ln+1}) \quad (13)$$

$$r_{ln-1/2} = 2r_{ln-1}r_{ln} / (r_{ln} + r_{ln-1}) \quad (14)$$

$$\text{由式(2)得: } P_{ln}^0 = 0, \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N) \quad (15)$$

$$\text{由式(3)得:} \quad \frac{P_{b2} - P_{b1}}{r_{b2} - r_{b1}} = -1 \quad (16)$$

$$\text{由式(4)得:} \quad P_{bN} = 0 \quad (17)$$

$$\text{由式(5)得:} \quad \frac{P_{bN} - P_{bN-1}}{r_{bN} - r_{bN-1}} = 0 \quad (18)$$

经整理,式(12),(16),(17)或(18)可化成 N 阶三对角线性方程组,用矩阵形式表示如下

$$AP = B \quad (19)$$

由于系数矩阵 A 满足主对角占优,故式(19)可采用追赶法直接求解.这样,经过 $j=1,2,\dots,M$ 个时间步长的计算,即可得到关井时刻油藏中两相区内的压力分布和饱和度分布.用数学公式表示为

$$P_{in}(r_b, t_{b0}) = g(r_{in}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (20)$$

1.3 关井阶段的压力求解方法

注水井压力降阶段仍满足基本的扩散方程(1),初始条件为式(20),而内边界条件必须考虑井筒储存和井底污染的影响,由下两式表示

$$C_b \frac{dP_{wb}}{dt_b} - \frac{\partial P_b}{\partial r_b} \bigg|_{r_b=r_{b1}} = -1 \quad (21)$$

$$P_{wb} = \left(P_b - S \frac{\partial P_b}{\partial r_b} \right)_{r_b=r_{b1}} \quad (22)$$

式中 C_b 为无因次井筒储存系数, $C_b = \frac{1}{6.28} C_p C_{hr}^2$; C 为井筒储存系数, m^3/MPa ; S 为污染系数.

用式(21)和式(22)代替注水阶段数学模型中的式(3),即可得到关井阶段的数学模型.采用同样的方法进行差分,也可得到其三对角线性方程组,其求解方法也同前.应用这种方法计算的注水井压力降试井的典型图版见图2.

典型图版的纵轴是压力及压力导数.横轴是组合了前缘半径后的无因次压力降时间.图版中有两组曲线,每组曲线的位置是由无因次井筒储存系数 C_b 与无因次参数 $\tau (0.0133 q \mu_o t / \mu_o q_{pr}^2)$ 比值的大小决定的.每一条曲线对应着两个参数 $C_b e^{2s}$ 和 τe^{2s} . τe^{2s} 相同的曲线,尽管 C_b 不同最后也

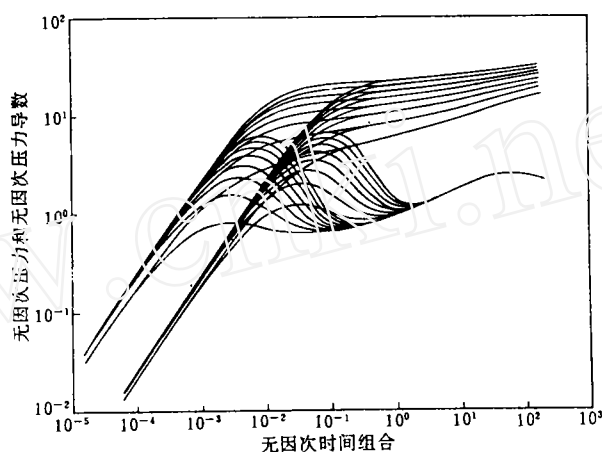


图2 注水井压力降落典型图版

完全重合.导数曲线由于两相区的影响逐渐上翘,最高点对应着水驱前缘的位置.由求解过程可知,注水井的压力降典型曲线与油井的试井典型曲线完全不同,前者取决于地层的相对渗透率曲线等地层物性参数,而后者与这些参数无关,即:测试层位不一样,注水井的压力降典型图版也不一样.

2 注水井试井分析解释软件

在理论分析计算基础上,按照软件工程的设计思想编制了注水井试井分析软件.该软件有五大模块组成:输入与编辑模块、常规试井分析模块、现代试井分析模块、可靠性检验模块和结果输出模块.该软件具有下列功能和特点:(1)可分析注水井压力降试井,并提供水相渗透率、

地层的污染系数、水驱前缘的位置、注水油藏的平均压力及边界的类型及距离等参数;(2)采用了模块技术和弹出式菜单驱动技术,具有优越的用户界面,操作方便,只要具备一些基本的油藏工程知识即可使用本软件;(3)以现代分析技术为中心,采用了双对数图版拟合技术和自动拟合技术,尤其是在分析边界影响方面具有较强的功能,可对封闭外边界、常压外边界及各种类型的断层(夹角为180°,120°,90°,60°,45°,15°)进行分析;(4)具有较严密的检验系统,对每一解释结果都要经过无因次霍纳检验和测压历史检验,若检验不满足要求,则重新进行分析,直到检验满意为止,以确保输出结果的正确性;(5)具有较广泛的运行环境,在配有VGA显示器的微型计算机上即可运行,并可在打印机或绘图仪上输出图形。

3 实例分析

该实例是对我国ZY油田一口注水井进行的压力降测试。测试前该井已注水14个月,累积注水62200 m³,平均日注水量147 m³。油藏和注水井的其他参数见表1,地层的相对渗透率数据见表2。

表1 油藏和注水井的基本参数

吸水层厚度(m)	9	岩石压缩系数(1/MPa)	0
孔隙度(%)	20	注水井半径(m)	0.1
油粘度(mPa.s)	25.3	水体积系数	1
水粘度(mPa.s)	0.5	注水时间(h)	10152
油压缩系数(1/MPa)	1×10^{-4}	累积注水量(m³)	6.22×10^4
水压缩系数(1/MPa)	1×10^{-5}		

表2 地层的相对渗透率数据

S_w	K_{rw}	K_{ro}
0.200	0.800	0.000
0.277	0.608	0.005
0.323	0.505	0.013
0.354	0.442	0.019
0.431	0.303	0.044
0.492	0.210	0.071
0.538	0.152	0.095
0.600	0.089	0.133
0.662	0.043	0.178
0.738	0.008	0.242
0.800	0.000	0.300

实测压力导数曲线上翘的主要原因是由于油水粘度差较大,形成较大的两相区所至。图3和图4分别为实测霍纳曲线及双对数拟合图。图3中 t 为关井时间,h; T_w 为累积注水时间,h。常规试井分析结果与现代试井分析结果见表3。

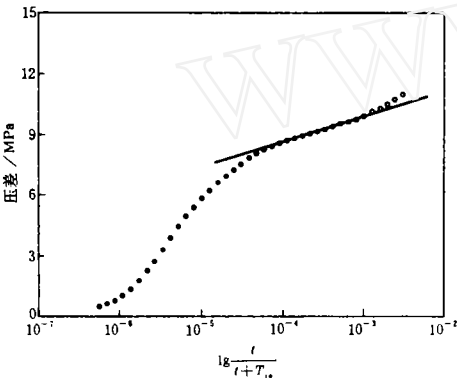


图3 霍纳曲线分析图

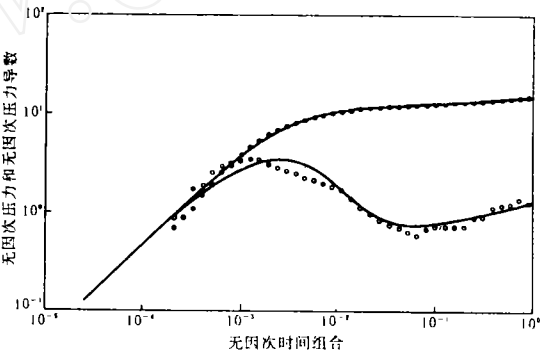


图4 双对数曲线分析图

由表3可看出,由霍纳法(常规分析)得到的水相渗透率偏低,主要的原因是由于两相区的影响,实测曲线上没有出现真正的直线,双对数图上的导数曲线上翘即说明此问题。正是由于两相区的影响未加考虑,使得解释出的相对透率偏小而污染系数偏大。

4 结 论

(1)利用 Buckley-leverett 驱油方程和数值差分方法快速计算注水井压力降落,可大大提高制作注水井典型图版的速度,为注水井试井分析提供方便。

(2)利用注水井试井可监控注水前缘、分析地层动态及注水井边界情况,可为注水井的增注措施提供依据。

(3)注水井试井的典型图版取决于实际地层物性参数,实际分析过程中应运用实际资料来制作典型图版。

(4)两相区对于注水井压力降测试有较大的影响,在高粘油藏,应严格区分油水粘度差别大造成的压力导数曲线的上翘和外边界或断层的影响造成的压力导数曲线的上翘。

表3 常规试井与现代试井分析结果比较

参数名称	常规试井分析	现代试井分析
水相渗透率(10^{-3} ,m ²)	1.49	2.02
污染系数	8.44	7.36
储存系数(m ³ /MPa)		0.0013
前缘半径(m)		234
平均油层压力(MPa)	19.23	

参 考 文 献

- 1 Hazebroek P. Pressure Falloff in Water Injection Well. Trans. , AIME,1958,213:250~260
- 2 Kzemi H, Morrill L S. Problem in Interpretation of Pressure Falloff Tests in Reservoirs With and Without Fluid Banks. JPT Sept. 1972;1147~1156
- 3 Woodward D K, Thambynayagam R K M. Pressure Buildup and Falloff Analysis of Water Injection Tests. SPE 13244. 1982
- 4 Weinstein H G. Cold Water Flooding a Warm Reservoir. SPE 5083,1980
- 5 Sosa A, Raghavan. Effect of Relative Permeability and Mobility Ratio on Pressure Falloff Behavior. JPT June. 1981;1125~1135
- 6 Abbaszadeh M, Kamal M M. Transient Pressure Tests for Water Injection Well. SPERE Feb. 1989
- 7 Mathews C S. 李祐佑等译. 油层压力恢复和油气井测试. 北京:石油工业出版社. 1982

ANALYSIS METHOD FOR PRESSURE FALL-OFF TEST OF WATER INJECTION WELL AND APPLICATION

Yao Jun Li Aifen

Li Gujiang

(University of Petroleum, Dongying China 257062) (Dagang Oilfield)

Abstract The test analysis models for water injection well are established. Those models describe the process of water displacing oil. The method for quickly calculating pressure and fluid saturation distribution at arbitrary time with Buckley-Leverett's equation and numerical differentiation is presented. Taking the pressure and fluid saturation distribution as initial conditions for pressure fall-off test analysis model, the pressure fall-off can be calculated after shutting the water injection well. By this theory, a set of typical curves of test analysis for water injection well is given. A software system for the water injection well test analysis was developed. The function and characteristics are introduced. A practical example dealt with by this software system is given.

Subject words Water injection well; Well test; Pressure fall-off; Numerical calculation

About the first author Yao Jun, male, lecturer, was born in 1964. He graduated from the University of Petroleum and gained MS degree in 1990. He works on oil and gas reservoir engineering at the Dept. of Petroleum Engineering of the university.