

文章编号: 1000-4874(2004)03-0339-08

裂缝和洞与井筒连通的三重介质油藏 试井解释方法研究*

常学军¹, 姚军², 戴卫华², 王子胜²

(1. 中国矿业大学(北京校区), 北京 100083;

2. 石油大学(华东)石油工程学院, 山东东营 257061)

摘要: 针对由基岩、裂缝和溶洞组成的三重介质油藏提出了裂缝和洞与井筒连通的试井解释模型, 建立了相应的数学模型, 并采用 Laplace 变换和数值 Laplace 反演方法进行了求解, 分析了介质的弹性储容比、窜流因子以及裂缝渗透率比对压力响应的影响, 同时还提出了三重介质油藏的试井解释方法——利用遗传算法进行自动拟合, 并编制了实用软件, 实例分析表明了该新方法的可靠性和实用性。

关键词: 试井分析; 三重介质; 裂缝和洞—井筒连通

中图分类号: TV344, TE312 **文献标识码:** A

The study of well test interpretation method for a triple medium reservoir

CHANG Xue-jun¹, YAO Jun²,
DAI Wei-hua², WANG Zhi-sheng²

(1. China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

2. University of Petroleum of China, Shandong Dongying 257061, China)

Abstract: This paper presents a well test interpretation model for a triple medium reservoir composed of matrix, fracture and vugs. The mathematical model is established and analytical solution is presented by use of Laplace transform and numerical Laplace inverse method. The influence of storativity ratio, crossflow factor and fracture permeability on pressure response is analyzed. The well test interpretation method used for triple medium reservoir, namely, an automatic matching by use of genetic theory is presented. The applied software is developed and the practicability and reliability of the new method are indicated by the analysis of field data.

Key words: well test analysis; triple medium; connection of fracture and vugs with wellbore

* 收稿日期: 2002-11-12

基金项目: 国家“十五”重大科技攻关项目“塔河油田开发关键技术”(2001BA605A03)

作者简介: 常学军(1963~), 男, 河北蔚县人, 教授级高工, 硕士。

1 引言

20世纪以来,许多国家都在研究碳酸盐岩油气藏的渗流机理,相继提出了双孔单渗模型、双孔双渗模型、两类基岩和裂缝的组合模型以及考虑溶洞情况下的三重介质模型等等。我国在这方面起步较晚。从60年代才开始研究这类油气藏渗流模式,对裂缝性油气藏提出了许多种渗流模型并进行了各类的数值模拟和试井解释方法研究。

到目前为止,国内外所有研制的裂隙油藏试井解释软件都是基于双重介质基础上的,还没有把“洞”作为一种单独的介质进行处理,也没有出现孔隙洞型三重介质油气藏的配套试井解释软件。随着石油勘探开发的二次调整和深入,对于三重介质甚至三重介质油气藏的认识和研究将是今后国内外研究的一个热点。

2 裂缝和洞与井筒连通的三重介质试井解释模型

如图1是裂缝和洞与井筒连通的三重介质油藏的示意图。并作如下假设:

- (1) 油井以定产量生产;
- (2) 地层流体和岩石微可压缩,流体单相且压缩系数为常数;
- (3) 地层流体在三个渗流场内流动满足达西定律;
- (4) 不考虑井筒储存和表皮效应的影响;
- (5) 油井测试前地层中各点的压力均匀,都为 p_i ;
- (6) 忽略重力和毛管力的影响,并设地层中的压力梯度比较小;
- (7) 每种介质(基岩、裂缝或溶洞)的孔隙度与另一种介质的压力变化相对独立;
- (8) 裂缝和洞与井筒连通,而基岩只作为“源”项。基岩和裂缝之间、基岩和洞之间以及裂缝和洞之间发生拟稳态窜流。

由上述模型假设,可得到无因次渗流方程为:

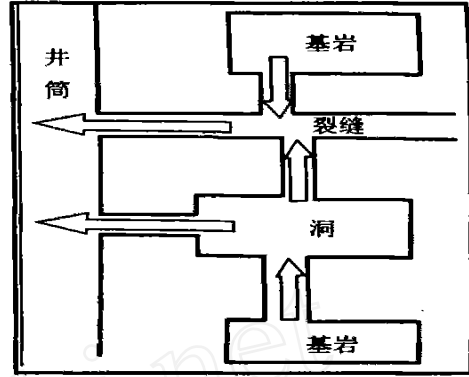


图1 物理模型

$$\begin{cases}
 K_f^* \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial P_{Df}}{\partial r_D} \right) + m_f (P_{Dm} - P_{Df}) + \\
 v_f (P_{Dv} - P_{Df}) = f \frac{\partial P_{Df}}{\partial t_D} \\
 K_v^* \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial P_{Dv}}{\partial r_D} \right) + m_v (P_{Dm} - P_{Dv}) - \\
 v_f (P_{Dv} - P_{Df}) = v \frac{\partial P_{Dv}}{\partial t_D} \\
 - m_f (P_{Dm} - P_{Df}) - m_v (P_{Dm} - P_{Dv}) = m \frac{\partial P_{Dm}}{\partial t_D}
 \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$r_D = \frac{r}{r_w}, \quad t_D = \frac{3.6(k_f + k_v)}{\mu r_w^2 (m C_m + f C_f + v C_v)} t$$

$$P_{Dj}(r_D, t_D) = \frac{(k_f + k_v) h}{1.842 \times 10^{-3} q \mu} [P_i - P_j(r, t)]$$

$$(j = m, f, v)$$

$$j = \frac{j C_j}{m C_m + f C_f + v C_v}$$

$$(j = m, f, v)$$

$$m_f = \frac{k_m r_w^2}{k_f}, \quad m_v = \frac{k_m r_w^2}{k_v}, \quad v_f = \frac{k_v r_w^2}{k_f}$$

$$K_f^* = \frac{K_f^*}{K_f^* + K_v^*}, \quad K_v^* = 1 - K_f^*$$

式中,下标 m 、 f 、 v 分别代表基岩系统、裂缝系统和溶洞系统, k_f 、 k_v 为裂缝、溶洞的渗透率, μm^2 ; $P = P(r, t)$ 为地层瞬时压力, MPa; ω 为孔隙度, 小数; C 为压缩系数, MPa^{-1} ; m_f 、 m_v 、 m_j 分别为基岩系统与裂缝系统、溶洞系统与裂缝系统以及基岩系统与溶洞系统之间的窜流系数; j ($j = m, f, v$) 分别为基岩、裂缝、和溶洞系统的弹性储容比; K_f^* 和 K_v^* 分别表示裂缝和溶洞系统的渗透率比; μ 为流体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; r_w 为井筒半径, m ; h 为油层有效厚度, m ; q 为井底流量, m^3/d ; P_i 为原始地层压力, MPa。

3 裂缝和溶洞与井筒连通的三重介质试井解释模型求解

3.1 无限大地层问题

渗流方程(1)和下列定解条件组成完整的数学模型。

内边界条件:

$$\left(K_f^* \frac{\partial P_{Df}}{\partial r_D} + K_v^* \frac{\partial P_{Dv}}{\partial r_D} \right) / r_D = -1 \quad (t_D > 0) \quad (2)$$

外边界条件:

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} P_{Dj}(r_D, t_D) = 0 \quad (j = m, f, v) \quad (3)$$

初始条件:

$$P_{Dj}(r_D, t_D) / t_D = 0 \quad (j = m, f, v) \quad (4)$$

利用 Laplace 变换方法得到拉氏空间的无因次压力解为:

$$\overline{P_{Df}}(r_D, s) = \frac{1}{s \left[\frac{D(s)}{K_1^0(\cdot)} + \frac{E(s)}{K_1^0(\cdot)} \right]} \quad (5)$$

其中,

$$K_1^0(\cdot) = \frac{K_0(\cdot)}{K_1(\cdot)}$$

$$D(s) = \frac{(a_2 - 1)(ka_1 + 1 - k)}{a_2 - a_1},$$

$$E(s) = \frac{(a_1 - 1)(ka_2 + 1 - k)}{a_1 - a_2}$$

$$a_1 = 1 + \frac{1}{m_f + \frac{m_f m_v}{m_s + m_f + m_v}}$$

$$\left(v_s - K_v^* \frac{2}{1} + \frac{m_v m_s}{m_s + m_f + m_v} \right)$$

$$a_2 = 1 + \frac{1}{m_f + \frac{m_f m_v}{m_s + m_f + m_v}}$$

$$\left(v_s - K_v^* \frac{2}{2} + \frac{m_v m_s}{m_s + m_f + m_v} \right)$$

3.2 有界圆形封闭地层问题

上述渗流方程和下列定解条件组成完整的数学模型。其他条件与无限大地层问题一样,封闭外边界条件为:(未列出的公式同 3.1)

外边界条件:

$$\frac{\partial P_{Df}}{\partial r_D} / r_D = r_D = \frac{\partial P_{Dv}}{\partial r_D} / r_D = r_D = 0 \quad (t_D > 0) \quad (6)$$

利用 Laplace 变换方法得到拉氏空间的无因次压力解为:

$$\overline{P_{Df}}(r_D, s) = \frac{1}{s \left[\frac{D(s)}{K_1^0(\cdot)} + \frac{E(s)}{K_1^0(\cdot)} \right]} \quad (7)$$

其中,

$$K_1^0(\cdot) = \frac{K_{00}(\cdot)}{K_{11}(\cdot)}$$

$$K_{00}(\cdot) = \frac{K_1(r_{eD})}{I_1(r_{eD})} I_0(r_D) + K_0(r_D)$$

$$K_{11}(\cdot) = - \frac{K_1(r_{eD})}{I_1(r_{eD})} I_1(r_D) + K_1(r_D)$$

3.3 有界圆形定压力地层问题

渗流方程(1)和下列定解条件组成完整的数学

模型。其他条件与无限大地层问题一样,定压外边界条件为:(未列出的公式同 3.1 与 3.2)

外边界条件:

$$P_{Df}(r_{eD}, t_D) = P_{Dv}(r_{eD}, t_D) = 0 (t_D > 0) \quad (8)$$

利用 Laplace 变换方法得到拉氏空间无因次压力解为:

$$\overline{P_{Df}}(r_D, s) = \frac{1}{s \left[\frac{D(s)}{K_1^0(r_1)} + \frac{E(s)}{K_1^0(r_2)} \right]} \quad (9)$$

其中,

$$K_{00}(r_D) = - \frac{K_0(r_{eD})}{I_0(r_{eD})} I_0(r_D) + K_0(r_D)$$

3.4 考虑井筒储存和表皮效应的无因次井底压力的计算方法

在拉氏空间利用 Duhamel 原理考虑井筒储存和表皮效应的影响。

设变产量 $q_D(t_D)$ 下的井底压力为 $P_{wD}(t_D)$, 由褶积分得:

$$P_{wD} = \int_0^{t_D} q_D(t_D - \tau) \left[\frac{\partial P_D(t_D - \tau)}{\partial t_D} + S \right] d\tau \quad (10)$$

式中, P_D 是产量为常数情况下的无因次井底压力; $P_D(t_D)$ 为无因次井底流量, $q_D = q(t)/q_{ref}$; q_{ref} 为参考流量; S 为表皮系数。

由无因次井筒存储系数 C_D 来表示变产量 $q_D(t_D)$, 则有:

$$q_D(t_D) = 1 - C_D \frac{dP_{wD}}{dt_D} \quad (11)$$

对(10)和(11)式进行 Laplace 变换,则有:

$$\overline{P_{wD}}(Z) = Z \cdot \overline{q}(Z) \cdot (\overline{P_D}(Z) + S/Z)$$

$$\overline{q_D}(Z) = 1/Z - C_D Z \overline{P_{wD}}(Z)$$

将上面两式进行整理,可得:

$$\overline{P_{wD}}(Z) = \frac{Z \cdot \overline{P_D}(Z) + S}{Z[1 + C_D Z(\overline{P_D}(Z) + S)]} \quad (12)$$

对式(5)、(7)、(9)利用 Stehfest 数值 Laplace 反

演方法可求得考虑井筒储存和表皮效应的无限大地层、圆形封闭地层和圆形定压地层的无因次井底压力。

上面所述均为各类数学模型的解析求解方法,也可将其渗流方程组差分离散展开进行数值求解,通过与数值解对比该解析方法正确。考虑到试井解释中压力响应的计算速度采用解析求解方法。

3 渗流规律分析

图 2—图 5 分别为裂缝和溶洞与井筒连通条件下无限大地层、圆形封闭地层和圆形定压地层和直线断层边界的典型无因次压力响应曲线。

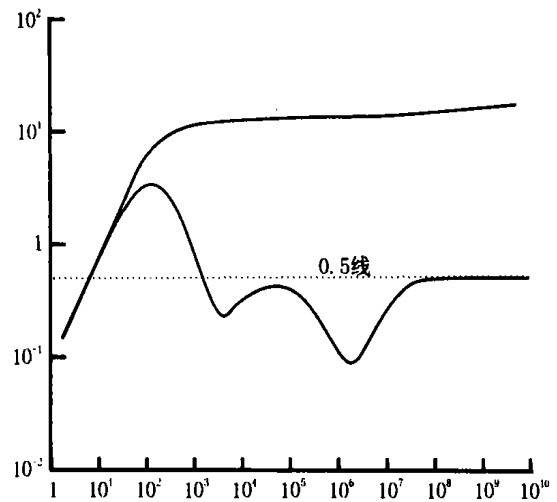


图 2 无限大地层

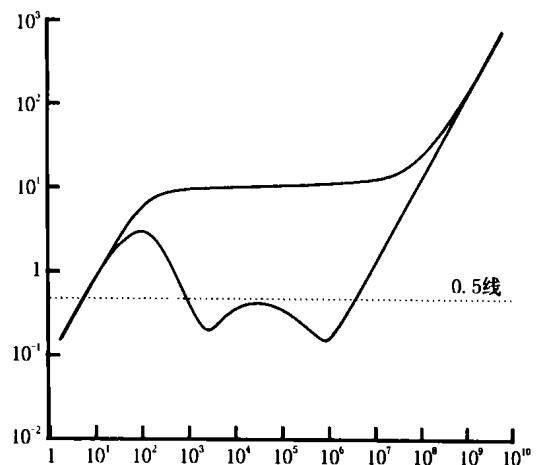


图 3 圆形封闭地层

由于裂缝和溶洞与井筒连通,开井生产时,裂缝和溶洞同时向井筒供液,此时裂缝系统和溶洞系统

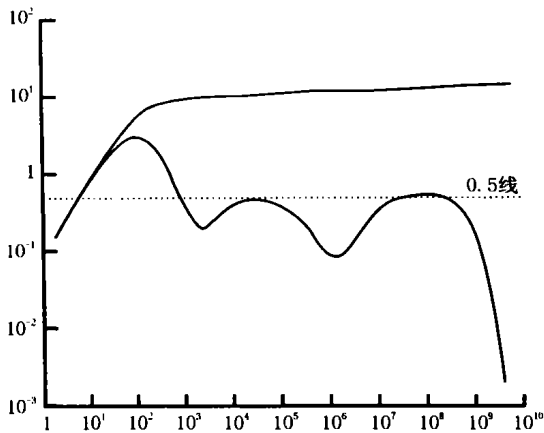


图4 圆形定压地层

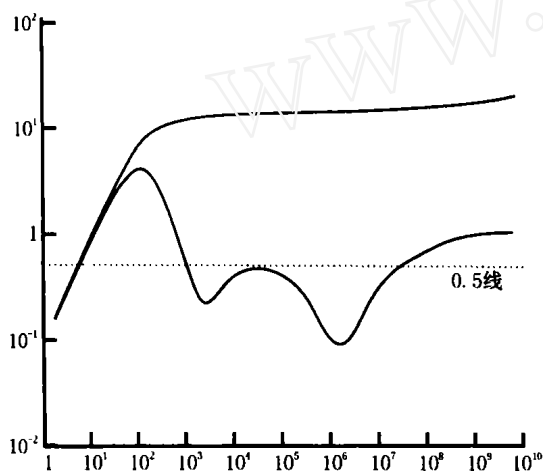


图5 直线断层边界

中的压力下降,而基岩系统压力不变,在溶洞与裂缝系统、基岩与裂缝系统以及基岩与溶洞系统之间形成了压力差,曲线特征与两层无窜流时相同。在压力差较小时,只有溶洞系统向裂缝窜流,导致图2~5中导数曲线中出现第一个下凹;当压力差进一步增加时,基岩系统向裂缝系统和溶洞系统窜流,导致图2~4中导数曲线中出现第二个下凹。而最后,表现为孔缝洞总生产系统(总渗透性,总储容性)均质特征,对于无限大油藏导数曲线变平,对于圆形封闭油藏和直线断层边界导数曲线上翘,对于圆形定压油藏导数曲线下降。

4 地层参数对压力响应的影响

4.1 窜流系数对压力响应的影响

图6所示为改变溶洞向裂缝窜流系数 ν_f 大小其它参数不变的不同压力响应曲线。由图可以看出,随着 ν_f 的增大,溶洞向裂缝窜流过渡段出现的时

间越早,在半对数曲线上代表过渡段曲线出现越早但形状不变,在双对数曲线上代表第一个下凹部分出现越早,过渡段曲线沿0.5水平线向左平移但形状不变。

图7所示为改变基岩向裂缝窜流系数 m_f 大小其它参数不变的不同压力响应曲线。由图可以看出,随着 m_f 的增大,基岩向缝洞窜流过渡段出现的时间越早,在半对数曲线上代表过渡段曲线出现越早但形状不变,在双对数曲线上代表第二个下凹部分出现越早,过渡段曲线沿0.5水平线向左平移但形状不变。

4.2 弹性储容比对压力响应的影响

图8所示为改变裂缝弹性储容比 f_f 大小时的不同压力响应曲线,在半对数曲线上,随着裂缝弹性储容比 f_f 的减小,第一条半对数直线和第二条半对数直线之间的距离就越大,同时第一条半对数直线在半对数曲线上变短且变高,表明洞与裂缝之间的窜流时间也就越长。在双对数曲线上,随着裂缝弹性储容比 f_f 的减小,导数过渡段曲线出现时间越长,同时下凹也越深。

图9所示为改变裂缝弹性储容比 ν_v 大小其它参数不变时的不同压力响应曲线,在半对数曲线上,随着溶洞弹性储容比 ν_v 的减小,第二条半对数直线和第三条半对数直线之间的距离就越大,同时第二条半对数直线在半对数曲线上变短且变高,表明基岩与缝洞之间的窜流时间也就越长。在双对数曲线上,随着溶洞弹性储容比 ν_v 的减小,导数过渡段曲线出现时间越长,同时下凹越深。

4.3 裂缝渗透率比对压力响应的影响

图10所示为改变裂缝渗透率比 k 大小,其它参数不变时的不同压力响应曲线。由图可以看出,在半对数曲线上,随着 k 值的增大,第一条半对数直线和第二条半对数直线之间距离就越大,同时第一条半对数直线在半对数曲线上变短且变高,表明洞与裂缝之间的窜流时间也就越长。在双对数曲线上,随着 k 值的增大,导数过渡段曲线出现时间越长,同时下凹越深。

5 试井解释方法

试井解释分析的基本思路是:先通过常规试井直线段分析,如早期纯井筒储存阶段的曲线可以求得井筒存储系数,晚期径向流阶段的曲线可以求得地层系数、地层有效渗透率、表皮系数以及油藏压

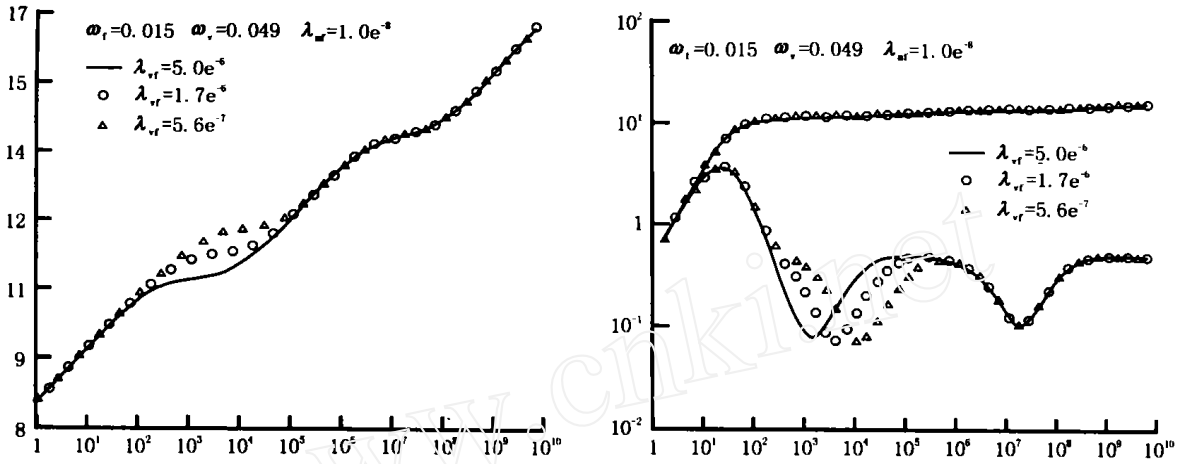


图6 溶洞向裂缝的窜流系数对压力响应的影响

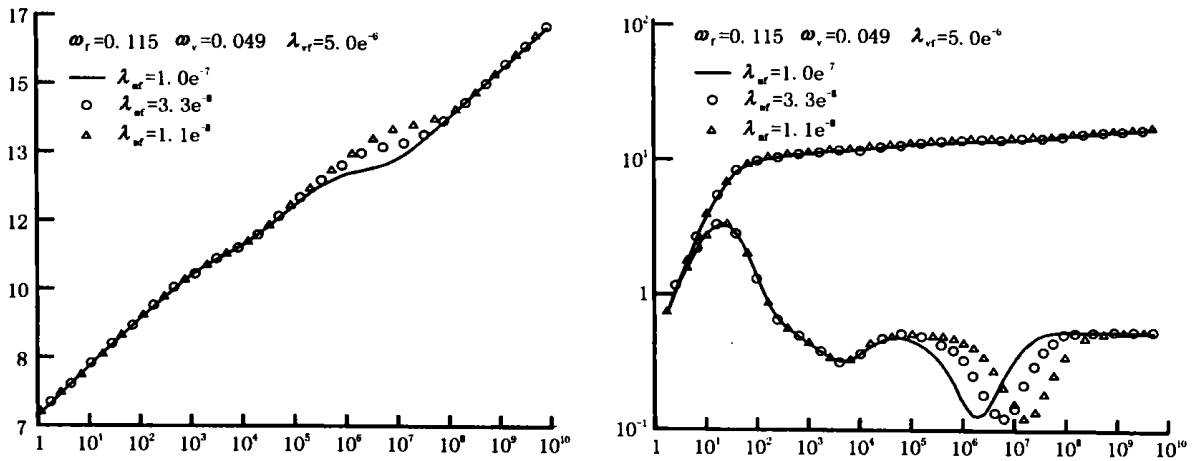


图7 基岩向裂缝的窜流系数对压力响应的影响

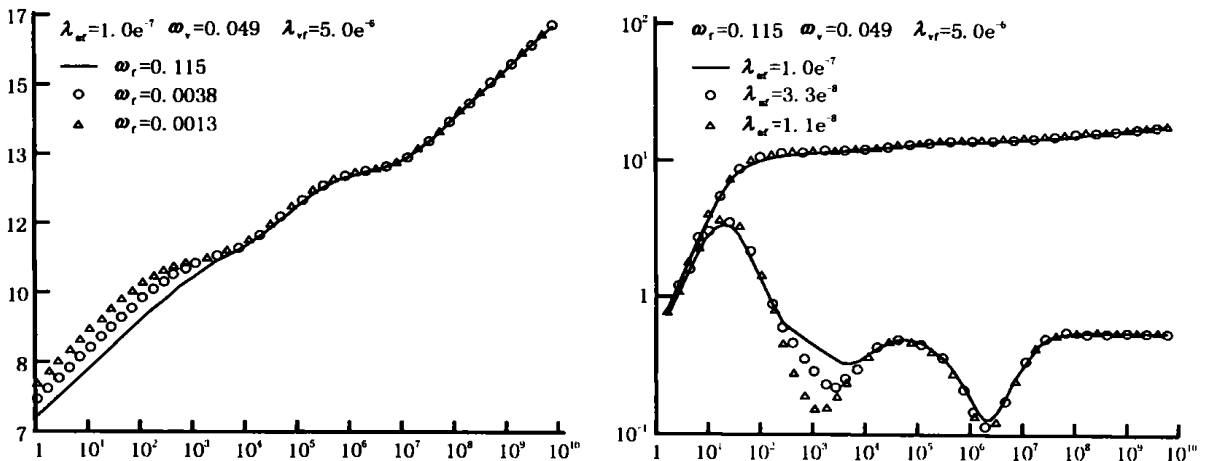


图8 裂缝系统弹性储容比对压力响应的影响

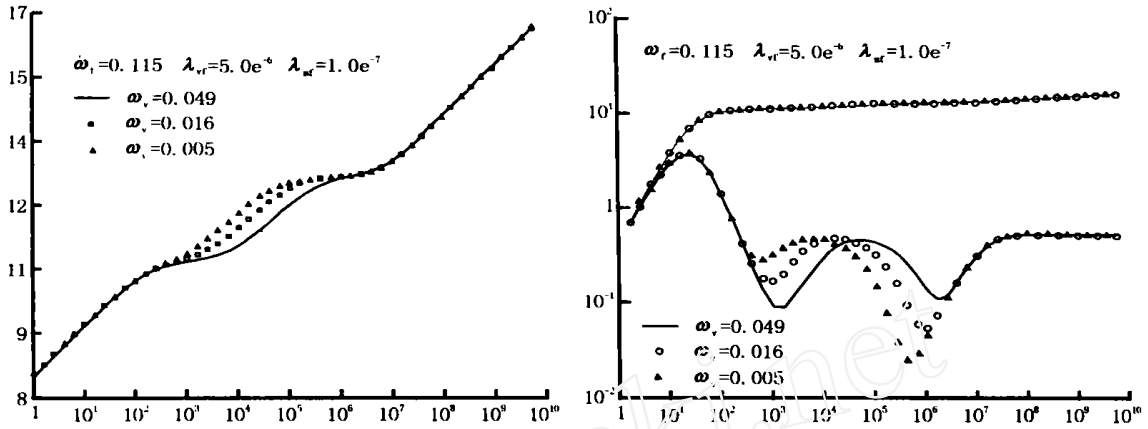


图9 溶洞弹性储能比对压力响应的影响

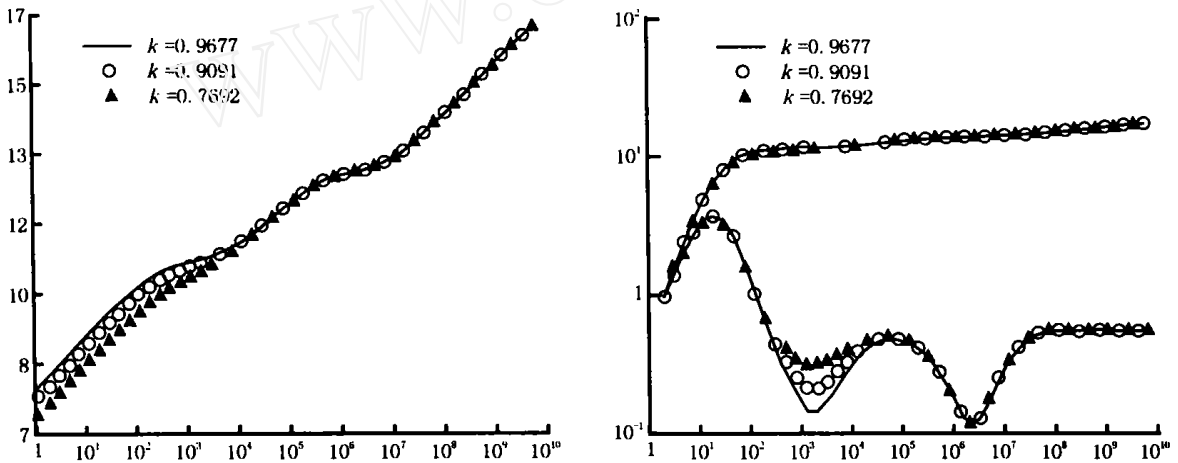


图10 裂缝渗透率比对压力响应的影响

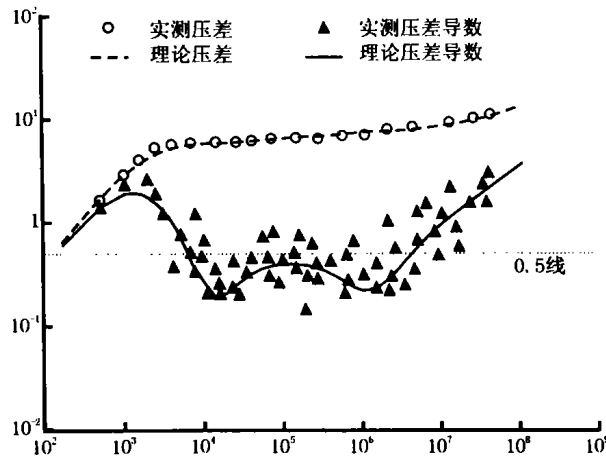


图11 TH油田 T313井双对数压力曲线拟合图

力。利用常规试井解释取得的部分初值代入试井模型,反复调用正演过程,结合遗传模拟退火算法,对初始参数不断进行修改、微调,直至算得的理论曲线与实测曲线完全拟合为止,整个试井解释过程是一个半

自动的分析过程。

对裂缝和洞与井筒连通的三重介质油藏模型,试井解释所要解释的参数主要是井筒存储系数、表皮系数、裂缝渗透率、洞渗透率、基岩向裂缝窜流系数、基

表1 TH油田某井物性参数取值表

参数名	取值	参数名	取值
孔隙度 (%)	15	含油饱和度	0.72
测试井半径 (m)	0.075	油层有效厚度 (m)	26.5
原油压缩系数 (MPa^{-1})	7.51×10^{-3}	原油地下粘度 ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	13.84
原油体积系数	1.098		

表2 TH油田某井解释参数表

参数名	解释值	参数名	解释值
井筒储存系数 (m^3/MPa)	0.394	表皮系数	-3.151
裂缝渗透率 (μm^2)	3.386	基岩向裂缝窜流系数	$9.230\text{e}-7$
溶洞渗透率 (μm^2)	4.986	基岩向溶洞窜流系数	$7.125\text{e}-7$
基岩弹性储容比	$9.324\text{e}-1$	裂缝向溶洞窜流系数	$1.487\text{e}-6$
裂缝弹性储容比	$1.325\text{e}-4$		

岩向溶洞窜流系数、溶洞向裂缝窜流系数、基岩弹性储容比、裂缝弹性储容比。

6 实例分析

TH油田某井位于奥陶系层位,属于典型的三重介质油藏,表(1)为该井所取的一些物性参数值。

该井在2001年1月份关井并进行试井测试,共测得237个小时的压力恢复数据,测试过程中数据无漏失,原始数据合格。

选择“三重介质油藏-井连通+井筒储存+表皮系数+圆形封闭边界”试井解释模型,应用本方法对TH油田某井的试井测试数据进行解释分析。通过对半对数直线段分析和曲线自动拟合,解释参数值如表(2)所示,图11为该井的双对数曲线拟合图。

7 小结

利用本文方法对TH油田多口测试井具有三重介质油藏压力响应的数据进行了试井分析,均取得了较好的分析效果。

(1) 提出了裂缝和溶洞与井筒连通的三重介质油藏试井解释模型,利用Laplace变换方法,推导出了无限大地层,圆形封闭地层和圆形定压地层的解析解。

(2) 由模型求解的压力曲线分析,三重介质的压力响应半对数曲线上会出现两个台阶,双对数曲线上会出现两个凹陷,曲线上台阶或凹陷的位置和形状与孔隙、裂缝以及溶洞三者的弹性储容比和彼此之间的窜流系数有关。

(3) 窜流系数、弹性储容比以及裂缝渗透率比对三重介质油藏压力响应影响明显。

(4) 利用半对数直线段分析以及压力曲线自动拟合可以成功地解释三重介质油藏的试井测试数据。

参 考 文 献:

- [1] 《试井手册》编写组编. 试井手册(下)[R]. 1992.
- [2] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 北京:石油工业出版社. 1996.
- [3] 刘尉宁. 现代试井分析方法的新进展及解释软件[R]. 中国石油天然气总公司情报研究所. 1989.
- [4] 栾志安等译. 试井分析方法[M]. 北京:石油工业出版社. 1985.
- [5] DERUGCK B G, et al. Interpretation of Interference Tests in Reservoirs with Double Porosity Behavior: Theory and Field Examples[R]. SPE 11025.
- [6] BOURDET D, AYOUB J A, WHITTLR T M, PIRARD Y M, KNIAZEFF V. Interpreting well tests in fractured reservoir[J]. World Oil, 1983, 5: 52-55.