

文章编号: 0253-9985(2004)03-0333-05

深层低渗凝析气藏试井解释方法及其应用探讨

黄学锋^{1,2}, 杨世刚³

(1. 中国石化中原油田分公司西部勘探经理部, 河南濮阳 457001; 2. 中国地质大学, 湖北武汉 430074;
3. 中国石化中原油田分公司油藏监测研究中心, 河南濮阳 457001)

摘要: 针对中原油田濮67、白庙、桥口等深层低渗凝析气藏的相态变化和渗流特征, 综合运用考虑孔隙介质吸附、毛细凝聚等物理化学界面效应影响的凝析油气体系相平衡计算方法和凝析油气两相渗流方程, 以及通过引入凝析油-气两相拟压力函数和渗流方程线性化处理所得到的均质凝析气藏试井解释方法, 探索了适合于中原濮67、白庙、桥口等深层低渗凝析气藏试井资料的常规及现代试井解释方法。经实例分析, 证实了孔隙介质吸附及毛细凝聚对试井解释结果有较大影响, 一是储层有效渗透率降低; 二是表皮系数增大。

关键词: 低渗透; 凝析气藏; 界面效应; 试井分析模型; 试井解释

中图分类号: TE35.2 文献标识码: A

Well test interpretation methods and application in deep condensate gas reservoir with low permeability

Huang Xuefeng^{1,2} Yang Shigang³

(1. Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan; 2. China University of Geosciences, Wuhan, Hubei;
3. Reservoir Monitoring Research Center of Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan)

Abstract: Considering the phase change and percolation characteristics of deep condensate gas reservoirs with low permeability, such as Pu 67, Baimiao and Qiaokou condensate reservoirs in Zhongyuan oilfield, conventional and modern well test interpretation methods, applicable to these reservoirs, have been developed by integrating phase equilibrium computation process of condensate oil-gas system that take into consideration of physical and chemical interfacial effects, such as pore medium adsorption and capillary condensation, and condensate oil-gas two-phase percolation equations, as well as well test interpretation methods of homogeneous condensate gas reservoirs that are achieved through introducing linearization of condensate oil-gas two phase pseudopressure function and percolation flow equation. A case study of the influences of pore medium adsorption and capillary condensation on well test interpretation results has also been made.

Key words: low permeability; condensate gas reservoir; interfacial effect; well test analysis model; well test interpretation

近年来, 中原油田相继探明的桥口、白庙、濮67等凝析气藏普遍具有深层低渗、高温高压、富含凝析水、地露压差小、近饱和的地质特征^[1~5]。室内相态实验表明, 受这些特征的影响, 凝析气藏在开发过程中普遍存在孔隙介质吸附、毛细凝聚现象, 凝析油气易被吸附, 易造成近井地层反凝析动态地层伤害。由于吸附相不参与流动, 相当于缩小了渗流空间, 造成渗流阻力增大, 地层压力损失

增大, 使反凝析程度进一步加深; 脱附出的凝析液相堵塞地层渗流孔道, 使得气相相对渗透率明显下降, 这与凝析气井产能递减快的生产实际相符。针对深层低渗凝析气藏的相态变化和渗流特征, 本文运用考虑孔隙介质吸附、毛细凝聚影响的凝析油气水三相的渗流方程和相平衡方程, 并引入凝析液-气两相拟压力函数使渗流方程线性化、实用化; 同时通过建立均质凝析气藏的试井数学

模型,确立了适合于中原油田相继探明的桥口、白庙、濮67等深层低渗凝析气藏试井资料的常规及现代试井解释方法,为了解中原低渗凝析气藏气井近井地层压力变化规律,获取地层参数,进行凝析气井近井带地层反凝析污染评价、产能预测提供了重要和有效的手段。

1 低渗凝析气藏试井分析方法

1.1 流固耦合渗流模型

根据低渗凝析气藏相态变化和渗流特征,同时考虑孔隙介质中吸附和毛细凝聚效应对凝析油气体体系相态和渗流特征的影响,可得到以下考虑界面物理化学流固耦合效应的凝析油-凝析气体体系相平衡计算模型和渗流方程。

1.1.1 相平衡计算模型

在常规凝析气藏地层流体相平衡计算数学模型^[6]基础上,同时考虑孔隙介质中吸附^[7~9]和毛细凝聚效应^[10]对凝析油气体体系相态特征的影响,可得到以下含有界面效应影响的凝析油气体体系相平衡计算模型

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{iL} - f_{iV} = 0 \\ \sum_{i=1}^N \frac{n_i(K_i - 1)}{1 + (K_i - 1)n_g} = 0 \\ P^V - P^L - \frac{2\sigma \cos \theta}{r} = 0 \\ y_i \phi_i P - \gamma_i^{(s)} x_i \frac{n_m^{(s)} n_i^{(s), \infty}}{n_m^{(s), \infty} b_i} \left| \frac{\exp \alpha_{iV}}{1 + \alpha_{iV}} \right| \exp \\ \left| \left| \frac{n_i^{(s), \infty} - n_m^{(s), \infty}}{n_m^{(s)}} - 1 \right| \ln \gamma_V^{(s)} x_V^{(s)} \right| = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中 f_{iL} 为 i 组分在液相中的逸度, atm (= 0.101 3 MPa); f_{iV} 为 i 组分在气相中的逸度, atm (= 0.101 3 MPa); n_g 为地层流体中气相摩尔分数; K_i 为 i 组分的平衡常数; P^V , P^L 分别为气相、油相压力, atm (= 0.101 3 MPa); σ 为界面张力, dyn/cm; θ 为润湿角, ($^\circ$); r_c 为毛管孔道半径, cm; ϕ_i 为自由相中 i 组分的逸度系数, 无因次; y_i , x_i 分别为气、液相摩尔组成, f; $\gamma_i^{(s)}$ 为吸附相中 i 组分的活度系数, 无因次; $\gamma_V^{(s)}$ 为吸附相中空穴溶液 i 组分的活度系数, 无因次; $x_i^{(a)}$ 为吸附相中 i 组分摩尔组成, f; $x_V^{(a)}$ 为吸附相中空穴溶液 i 组分摩尔组成, f; $n_m^{(s)}$ 为混合气体的吸附量, 摩尔分数; $n_m^{(s), \infty}$ 为混合气体的

饱和吸附量, 摩尔分数; $n_i^{(s)}$ 为吸附相中 i 组分饱和吸附量, 摩尔分数; b_i 为吸附相中组分 i 的亨利常数; α_{iV} 为吸附相中各组分的二元交互作用系数。

以上4个方程分别给出了孔隙介质中多组分凝析油气体体系达到相平衡时气液相中各组分热力学平衡(逸度相等)、物质平衡(组成归一化)、气液相毛管压力平衡(毛细凝聚)以及气固吸附平衡条件。

1.1.2 渗流方程

综合考虑多孔介质凝析油气体体系相态变化、多孔介质表面吸附等因素的影响,通过建立径向微元体渗流的物质平衡关系并进行数学推导,就可得到凝析油气体体系的渗流方程。

(1) 凝析油气两相渗流的连续性方程

通过建立径向微元体渗流的物质平衡关系并进行数学推导,就可得到凝析油气体体系渗流的连续性方程

$$\frac{1}{r} \left| \left| \rho_o + \rho_{og} R_s \right| v_o + \rho_g v_g \right| + \frac{\partial \left| \left| \rho_o + \rho_{og} R_s \right| v_o + \rho_g v_g \right|}{\partial r} = \phi \frac{\partial}{\partial t} \left| \left| \rho_o + \rho_{og} R_s \right| S_o + \rho_g S_g + \rho_a S_a \right| \quad (2)$$

式中 r 为渗流半径, cm; ρ_g , ρ_o , ρ_{og} , ρ_a 分别为气、油、溶解气和吸附相的密度, g/cm³; S_g , S_o , S_a 分别为气、油、吸附相饱和度, f; R_s , R 分别为地层和 PVT 测试条件下溶解气油比; P 为地层压力, MPa。

(2) 凝析油气两相渗流的运动方程

设地层中凝析油、气流体的渗流仍遵循达西定律,则油、气相运动速度为

$$v_o = \frac{k k_{ro}}{\mu_o} \text{grad} p = \frac{k k_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (3)$$

$$v_g = \frac{k k_{rg}}{\mu_g} \text{grad} p = \frac{k k_{rg}}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (4)$$

式中 k_{rg} , k_{ro} 分别为气相、油相的相对渗透率; μ_g , μ_o 分别为气、油两相的粘度, mPa·s。

(3) 凝析油气两相不稳定渗流微分方程

把运动方程(3)式和(4)式代入连续性方程(2)式中,即可得到凝析气藏不稳定渗流微分方程。

(a) 总烃(相)方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left| r k \left| \frac{k_{ro}}{\mu_o} \rho_o + R_s \rho_{og} + \frac{k_{rg}}{\mu_g} \rho_g \right| \frac{\partial P}{\partial r} \right| =$$

$$\Phi \frac{\partial}{\partial r} [(\rho_o + R_s \rho_{og}) S_o + \rho_g S_g + \rho_a S_a] \quad (5)$$

式中 Φ 为孔隙度, f ; t 为时间, s 。

(b) 组分(相)方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rk \left| \frac{k_{ro}}{\mu_o} (\rho_o + R_s \rho_{og}) x_i + \frac{k_{rg}}{\mu_g} \rho_g y_i \right| \frac{\partial P}{\partial r} \right] =$$

$$\Phi \frac{\partial}{\partial r} [(\rho_o + R_s \rho_{og}) S_o x_i + \rho_g S_g y_i + \rho_a S_a x_{ai}] \quad (6)$$

1.2 微分方程的线性化

1.2.1 拟压力函数的引入和计算

凝析油气渗流微分方程(6)中物性参数 μ_m , k_{rm} , ρ_m , ρ_{og} , ρ_a , R_s ($m = o, g$) 等均是压力或组成的函数, 因此方程(6)是高度非线性化的。迄今, 人们还没有寻求到这类非线性方程的有效的解析求解方法, 只能采用某种变换或一些假设条件来寻求该类方程的线性化, 简化后求解。因此, 在此, 定义一种两相拟压力函数

$$\phi(P) = \int_{P_0}^P \left[\frac{k_{ro}(\rho_o + R_s \rho_{og})}{\mu_o} + \frac{k_{rg} \rho_g}{\mu_g} \right] dP \quad (7)$$

式中 P_0 为任意选定的参考压力。由(7)式可看出, 所有与相态、物性、相对渗透率有关的资料均隐含在拟压力函数当中。这样, 就可用处理类似于单相流动的方法来处理两相流动问题。但是两相拟压力函数的计算却与地层中反凝析液饱和度和压力相关, 因此, 只有先得出有关凝析气藏中反凝析油饱和度与压力的关系后, 才有可能准确计算两相拟压力。

1.2.2 反凝析液饱和度的确定

前苏联阿巴索夫等人^[11, 12]在对凝析气井产物进行热动力学研究的基础上, 建立了地层凝析油气渗流的二元模型, 用该模型来描述凝析气藏内发生的反凝析过程具有相当的客观性。因此, 借用其处理方法, 可建立反映地层凝析油气渗流的凝析油相饱和度与压力的关系。

根据渗流方程(5)和(6)式左侧各项的物理意义, 引入凝析气油比这一概念, 它等于通过任一垂直于流动方向的断面的凝析气体和凝析油的流量之比。这里主要指井流体中采出的凝析气与凝析油的流量之比, 相当于生产气油比。即

$$R = \frac{\frac{k_{ro} \rho_{og} R_s}{\mu_o B_o} + \frac{k_{rg} \rho_g (1 - y_c)}{\mu_g B_g}}{\frac{k_{ro} \rho_o}{\mu_o B_o} + \frac{k_{rg} \rho_g y_c}{\mu_g B_g}} =$$

$$\frac{\frac{k_{ro} \rho_{og} R_s}{\mu_o B_o} + \frac{PT_{sc}}{PT_{sc} TZ_g} \frac{k_{rg} \rho_g (1 - y_c)}{\mu_g}}{\frac{k_{ro} \rho_o}{\mu_o B_o} + \frac{PT_{sc}}{PT_{sc} TZ_g} \frac{k_{rg} \rho_g y_c}{\mu_g}} \quad (8)$$

式中 T 为地层温度, K ; y_c 为地层凝析气中可凝析油相的摩尔含量, f ; B_g , B_o 分别为气相、油相的体积系数。

按阿巴索夫的处理方法^[11], 并利用封闭地层在封闭外边界处压力梯度为零的条件, 由渗流连续性方程(5)、(6)适当简化整理可得

$$R = \frac{d \left[\frac{\rho_{og} R_s}{B_o} S_o + \frac{\rho_g (1 - y_c)}{B_g} S_g \right]}{d \left[\frac{\rho_o}{B_o} S_o + \frac{\rho_g y_c}{B_g} S_g \right]} \quad (9)$$

相对于压力 P 求导数, 则可得

$$\frac{dS_o}{dP} = \frac{S_o \left[\frac{\rho_{og} R_s}{B_o} \right]' + S_g \left[\frac{\rho_g (1 - y_c)}{B_g} \right]' - R \left[S_g \left[\frac{\rho_g y_c}{B_g} \right]' + S_o \left[\frac{\rho_o}{B_o} \right]' \right]}{R \left[\frac{\rho_o}{B_o} - \frac{\rho_g y_c}{B_g} \right] + \frac{\rho_g (1 - y_c)}{B_g} - \frac{\rho_{og} R_s}{B_o}} \quad (10)$$

若要忽略溶解气油比项, 则直接令 $R_s = 0$ 即可。式中 B_g 也可换算为 $B_g = P_{sc} TZ_g / PT_{sc}$ 。另外, 方程(8)~(10)中未直接考虑孔隙介质对凝析油、气的吸附影响, 若在其中计及吸附, 即凝析气油比(生产气油比)中包含有解吸的吸附流体, 则上述公式将变得相当复杂, 求解十分困难。所以在这里暂时不直接考虑吸附对气相组成的影响, 只将吸附考虑在对其中参数的影响改变之中。此时, $S_o + S_g + S_a = \tilde{S}_o + S_g = 1$ 。当间接考虑吸附影响时, 由式(10)求出的凝析油饱和度 S_o 即相当于 $\tilde{S}_o$, 其中包含了吸附相饱和度 S_a 。式(10)即为凝析油饱和度与地层压力的关系式。

1.3 方程的线性化

根据上面引入的两相拟压力函数式(7), 对凝析油气藏渗流微分方程(5)作变换和简化处理后就可得到渗流微分方程的线性化关系式

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] = \frac{1}{D_h} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\phi}{k} \frac{\partial \phi}{D_h' \partial t} \quad (11)$$

式中

$$D_h = \frac{k}{\phi \left[(\rho_o + R_s \rho_{og}) S_o \right]' + (\rho_g S_g)' + (\rho_a S_a)'} \quad (12)$$

$$D'_h = \frac{\frac{k_{ro}(\rho_o + R_s \rho_{og})}{\mu_o} + \frac{k_{rg} \rho_g}{\mu_g}}{[(\rho_o + R_s \rho_{og}) S_o]' + (\rho_g S_g)' + (\rho_a S_a)'} = \frac{\phi}{k} D_h \quad (13)$$

这样, 方程(11)与单相流体渗流的微分方程极为相似。但 D_h 或 D'_h 的表达式中含有吸附相流体的密度 ρ_a , 而吸附相中既有被吸附的凝析气又有被吸附的凝析油, 它与地层压力、温度、流体组成等多因素相关, 要确定 ρ_a 有一定难度, 为此, 可采用平均法处理, 即

$$\rho_a = \rho_o y_a + \rho_g (1 - y_a) \quad (14)$$

在方程(11)中, D_h 仍为压力的函数, 方程(12)仍是变系数的二阶非线性偏微分方程, 求其解仍有相当大的困难。为此, 只能近似求解, 即线性化方法。将 D_h 看成是地层温度和地层平均压力下的值, 这样, 方程(11)即可变为可以求解的线性方程。

1.4 常规试井分析

不稳定渗流数学模型^[13~14]: 由式(11)~(13)给出。

内边界条件:

$$r \frac{\partial \phi}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = \frac{m_i}{2\pi k h} \quad m_i = q_o \rho_o + q_g + \rho_g$$

封闭外边界:

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} \Big|_{r=r_e} = 0$$

定压外边界:

$$\phi(r_e, t) = \phi_i$$

无穷大地层:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \phi(r, t) = \phi_i$$

初始条件:

$$\phi(r, 0) = \phi_i$$

无穷大地层解:

$$\phi(r, t) = \phi_i - \frac{m_i}{4\pi k h} \left| -E_i \right| - \frac{r^2}{4D_{ht}} \Big|$$

式中 m_i 为地层凝析气质量流量, kg/d。

封闭地层解:

$$\phi(r, t) = \phi_i - \frac{m_i}{2\pi k h} \left[\frac{2D_{ht}}{r_e^2} + \ln \frac{r_e}{r} - \frac{3}{4} + \frac{r^2}{2r_e^2} \right]$$

式中 r_w, r_e 为凝析气井井筒和泄油半径, m。

1.5 均质模型现代试井分析

不稳定渗流数学模型

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left[\frac{\partial \phi_D}{\partial r_D} \right] = \frac{\partial \phi_D}{\partial t_D}$$

内边界条件一:

$$r_D \frac{\partial \phi_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} = -1 + C_D \frac{\partial \phi_D}{\partial t_D}$$

内边界条件二:

$$\phi_D \Big|_{r_D=1} = \phi_{wD} = \left[\phi_D - S \right] r_D \frac{\partial \phi_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} \sqrt{\frac{m_i D'_h}{i \pi h \phi}}$$

式中 S 为井筒表皮系数; h 为油层厚度, m。

外边界条件:

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} \phi_D(r_D, t_D) = 0$$

初始条件:

$$\phi_D(r_D, 0) = 0$$

拟压力:

$$\bar{\phi}_{wD} =$$

$$\frac{1}{z} \frac{K_0 \left[\sqrt{z/C_D e^{2S}} \right]}{z K_0 \left[\sqrt{z/C_D e^{2S}} \right] + \sqrt{z/C_D e^{2S}} \cdot K_1 \left[\sqrt{z/C_D e^{2S}} \right]}$$

式中 z 为拉氏空间变量。

地层参数的试井解释:

$$kh = \frac{m_i}{2\pi} \cdot \frac{[\phi_{wD}]_M}{[\Delta \phi]_M} \quad k = \frac{kh}{h} = \frac{m_i}{2\pi h} \cdot \frac{[\phi_{wD}]_M}{[\Delta \phi]_M}$$

$$C = \frac{kh}{\mu_{gi}} \cdot \frac{[\Delta t]_M}{[t_D/C_D]_M} \quad S = \frac{1}{2} \ln \frac{[C_D e^{2S}]_M}{C_D}$$

式中 C_D 为无因次井筒储存系数; t_D 为无因次时间。

2 实例分析

中原油田某凝析气井于2001年10月11~23日实施关井压力恢复测试, 测试层位: 沙河街组三段下亚段(Es_3^F); 测试井段: 3606.5~3612.6m; 有效厚度6.1m; 稳定产量: $Q_o = 0.5 \text{ m}^3/\text{d}$, $Q_g = 1.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 稳定时间: $t_p = 360 \text{ h}$; 孔隙度: 10.7%。考虑孔隙介质界面现象影响与不考虑孔隙介质界面现象影响的常规试井及现代试井解释结果的对比分别见图1~4。为便于理解, 预先说明的是: 图1和图2分别表示不考虑孔隙介质吸附与考虑孔隙介质吸附影响的解释图版, 二者形态相似但纵坐标值和直线斜率不同, 其中考虑孔隙介质吸附影响的纵坐标值要大一些, 直线斜率要小一些。同理, 图3和图4的形态也有一定差别, 但主要是无

因次参数在含义上有考虑孔隙介质界面效应与不考虑孔隙介质界面效应的差别。该井的常规半对数及均质双对数解释结果表明, 考虑多孔介质吸附影响时的解释结果不同于不考虑吸附影响的情况。存在介质吸附现象时, 有效渗透率减小, 降低了约 32.6%; 表皮因子增大, 增加约 15.49%。这是因为多孔介质吸附了部分凝析油气, 吸附相不参与流动, 堵塞了部分渗流通道, 增大了渗流阻力; 同时, 脱附出的凝析油气与反凝析液也会堵塞

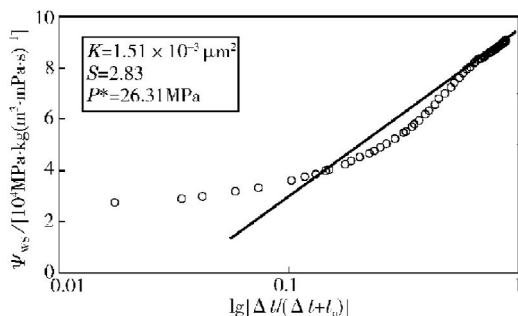


图1 Horner 试井分析(两相拟压力, 不考虑吸附)

Fig. 1 Horner well test analysis (two phase pseudopressure, without considering adsorption)

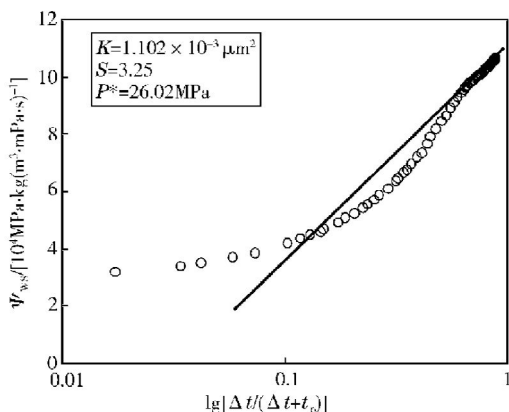


图2 Horner 试井分析(两相拟压力, 考虑吸附)

Fig. 2 Horner well test analysis (two phase pseudopressure, with considering adsorption)

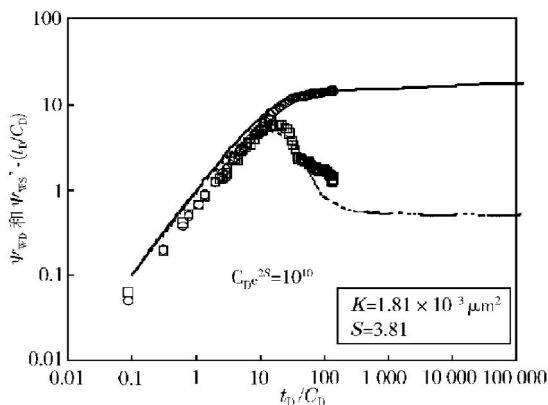


图3 均质模型现代试井分析(两相拟压力, 不考虑吸附)

Fig. 3 Modern well test analysis with homogeneous model (two phase pseudopressure, without considering adsorption)

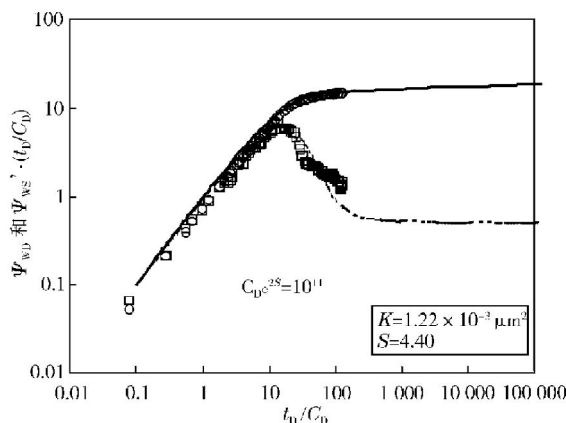


图4 均质模型现代试井分析(两相拟压力, 考虑吸附)

Fig. 4 Modern well test analysis with homogeneous model (two phase pseudopressure, with considering adsorption)

一定渗流空间, 造成有效渗透率“降低”, 表皮系数“增大”的现象。

3 结论及认识

(1) 深层低渗凝析气藏多孔介质表面的吸附客观存在, 可用气-固、液-固吸附理论来描述凝析油、气混合物在孔隙介质表面的吸附。

(2) 针对中原油田深层低渗凝析气藏的相态变化和渗流特征, 引入考虑孔隙介质吸附、毛细凝聚影响的凝析油气两相的渗流方程和相平衡方程更符合实际情况。

(3) 引入考虑地层油气比的凝析油-气两相拟压力方程对考虑孔隙介质吸附、毛细凝聚影响的渗流方程进行线性化处理, 可以较方便地得到均质凝析气藏界面物理化学流固耦合试井数学模型, 获得更为符合实际的凝析气藏试井资料的常规及现代试井解释方法。

(4) 通过实例分析, 研究了中原油田深层低渗凝析气藏孔隙介质吸附及毛细凝聚对试井解释结果的影响。考虑多孔介质吸附影响得到的地层有效渗透率低于不考虑吸附影响时的情况, 表皮系数则相反。

参 考 文 献

- 冯建辉, 谈玉明, 罗小平, 等. 东濮凹陷白庙构造油气源与成藏史[J]. 石油与天然气地质. 2003, 24(2): 130~135
- 谈玉明, 任来义, 张洪安, 等. 深层气泥岩盖层封闭能力的综合评价——以东濮凹陷杜桥白地区沙河街组三段泥岩盖层为例[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 191~195

(下转第 343 页)

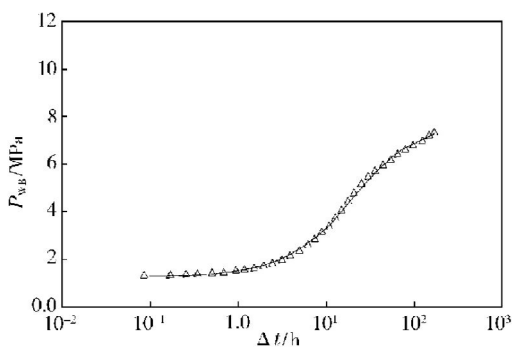


图9 a16井不删去径向流直线段的半对数拟合图

Fig. 9 Final fitting curve of semi logarithmic analysis in a16 well before deleting linear portion of radial flow

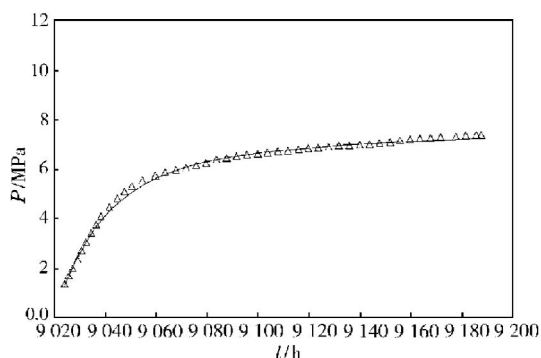


图10 a16井不删去径向流直线段的压力史拟合图

Fig. 10 Final fitting curve of pressure history in

a16 well before deleting linear portion of radial flow

较为准确的计算低渗透油藏的地层压力, 相对误差较小, 从而使大多数未出现径向流的试井测试资料, 得到有效的应用, 提高测试资料的利用率。

但是, 由于该项技术方法数学模型所限, 目前, 该项技术方法的应用尚存有局限性: ①方法只适于均质油藏; ②适宜于一个油田有多井次出现径向流直线段的试井资料; ③随着出现径向流直线的试井资料的增多, 回归式将更趋于完善。

参 考 文 献

- 1 张英魁, 张太春. 新民油田试井测试与试井解释存在问题及解决方法研究[J]. 油气井测试, 2002, 11(2): 29~31
- 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 石广仁. 地学中的计算机应用新技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. 8~21, 47~61
- 4 焦李成. 神经网络系统理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1990
- 5 焦李成. 神经网络的应用与实现[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1993
- 6 王天顺, 赵敏. 烃类体系相态特征图的 ANN 识别方法[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(2): 88~91
- 7 陈玲, 冯其红, 于红军. BP 网络方法在油田措施规划的应用[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(3): 78~80
- 8 杨久西. 谢凤桥构造油气层的人工神经网络识别[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 76~80
- 9 杨斌, 肖慈. 基于神经模糊系统的储层参数反演[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 173~176
- 10 张英魁, 胡光, 栾海波, 等. 油田注水开发中后期试井解释中基础参数的确定方法研究[J]. 油气井测试, 2001, 10(6): 23~25
- 11 王安辉, 张英魁, 高景龙, 等. 应用人工神经网络方法确定岩石压缩系数[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 105~107
- 12 张英魁, 刘斌. 利用多元回归方法确定岩石压缩系数[J]. 油气井测试, 2001, 10(1): 7~9

(上接第 337 页)

- 3 任战利, 冯建辉, 崔军平, 等. 东濮凹陷杜桥白地区天然气藏的成藏期次[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 376~381
- 4 常俊合, 李新军, 吕红玉, 等. 东濮凹陷文留潜山构造文古 2 井原油地球化学特征和油源对比[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 44~48
- 5 张洪安, 李继东. 白庙构造油气成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 45~49
- 6 Du Jianfen, Li Shilun, Sun Lei. Effect of porous medium adsorption on the percolation law of condensate gas mixture[R]. SPE50926, 1998
- 7 李士伦, 刘建仪, 孙雷, 等. 天然气工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000
- 8 O' Dell H G, Miller R N. Successfully cycling a low permeability high yield gas condensate reservoir[J]. JPT, 1967: 41~47
- 9 黄全华, 李士伦, 孙雷, 等. 考虑多孔介质吸附影响的凝析油气渗流[J]. 天然气工业, 2001, (2): 75~78
- 10 [美] 格雷格 S J, 辛 K S W. 吸附、比表面与孔隙率[M]. 高敬琮译. 北京: 化学工业出版社, 1989
- 11 阿巴索夫 M T, 奥鲁贾利耶夫 Ф Г. 凝析气田的开发及气水动力学[M]. 俞经方译. 北京: 石油工业出版社, 1993
- 12 米尔扎赞扎杰 A X, 杜尔米希扬 A Г. 凝析气田开发[M]. 杨培友译. 北京: 石油工业出版社, 1984
- 13 中国石油天然气总公司开发生产局. 试井理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996
- 14 郭康良, 周丽娟. 低渗气井压力恢复资料解释新方法[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(1): 59~62