

天然气开发

考虑水平井穿透复合气藏内区的不稳定产能分析

姜瑞忠¹, 郜益华¹, 孙召勃², 滕文超¹, 乔欣¹, 李渊¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 塘沽 300452)

摘要:在气藏的实际开发过程中,由于酸化、地层污染或气藏本身的地质特点,会形成水平方向上物性不同的复合气藏。针对这一问题建立了考虑穿透复合气藏内区的水平井不稳定渗流模型,并在此基础上进行了不稳定产能分析。采用拉普拉斯变换、Muskat方法、点源函数叠加和杜哈美原理求解模型,得到了复合气藏水平井在拉式空间下的不稳定拟压力解。由不稳定拟压力解和 Stehfest 数值反演方法得到了真实空间下水平气井的不稳定产量解。并绘制了不同条件下的无因次产能曲线,分析了水平井穿透内区后无因次内区半径、表皮系数、内外区流度比、外区与内区储容比对水平井产能的影响。

关键词:复合气藏;水平井;穿透内区;不稳定产能分析;无因次产能曲线

中图分类号:TE33 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2015)09-1773-08

引用格式:Jiang Ruizhong, Gao Yihua, Sun Zhaobo, *et al.* Rate transient analysis for horizontal well passing through inner region of composite gas reservoir [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(9): 1773-1780. [姜瑞忠, 郜益华, 孙召勃, 等. 考虑水平井穿透复合气藏内区的不稳定产能分析 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(9): 1773-1780.]

0 引言

目前,国内外学者^[1-11]对水平井产能进行了大量的研究,但涉及复合气藏产能分析的研究并不多。Joshi^[1]研究得出了适用于均质油藏水平井的稳态产能公式。Babu等^[2]提出了拟稳定状态下水平井的产能方程,分析了地层各向渗透率、水平井长度、泄油体积等因素对拟稳态产能的影响。陈志海等^[6]将适用于油藏的水平井产能公式改进为适合于气藏的产能公式。刘想平^[9]将水平井视为由若干段线汇组成,在水平井三维渗流的基础上,建立了考虑水平井筒流动的水平气井稳态产能计算模型。蒋开等^[11]应用 Newman 乘积原理和 Green 函数方法得到了水平气井不稳定压降解析解,在此基础上利用半解析法对水平井不稳定产能进行了计算。但上述模型均未考虑复合气藏的情况。对于复合油藏的水

平井渗流问题有部分学者进行了研究,Chen等^[12]给出了复合油藏内区、外区的点源解和线源解,在此基础上给出了复合油藏水平井压力动态。Ambastha等^[13]提出了利用矩形复合油藏模拟稠油注蒸汽热采的模型,采用数值方法分析了水平井完全在矩形复合油藏内区时的压力动态,论证了当内外区储容比和流度比很大时会出现反映内区边界的拟稳态阶段。王晓冬等^[14]运用汇源叠加的方法给出了不同边界条件下水平井完全在复合油藏内区时的压力动态特征并绘制了典型曲线。石国新等^[15]运用拉普拉斯变换、分离变量法及特征函数和特征值法对2区复合油藏不稳定试井问题进行了研究,给出了不同边界条件下的井底压力解,并对实例进行了分析。但这些模型均未考虑水平井穿透内区的情况。因此,笔者针对穿透内区的复合气藏水平井不稳定产能分析进行了讨论,并做出了无因次产量图版,分

收稿日期:2014-12-30;修回日期:2015-03-25.

基金项目:国家自然科学基金“页岩气藏多级压裂水平井流动特征及产能评价方法研究”(编号:51374227);国家重大专项“大型油气田及煤层气开发科技重大专项”课题“特低渗油藏有效开发技术”(编号:2011ZX0513-006);国家自然科学基金“基于新模型的低渗透油藏非线性渗流理论”(编号:51174223)联合资助。

作者简介:姜瑞忠(1964-),男,江苏溧阳人,教授,博士生导师,主要从事油气田开发研究. E-mail: jrzhong@126.com.

析了产能的影响因素。

1 复合气藏水平井产能模型

1.1 模型假设

对穿透复合气藏内区的水平井模型进行简化,如图1所示。该模型的假设为:气藏厚度为 h ,气藏顶底边界为封闭边界;复合气藏初始压力为 p_i ;气藏分为内外2区,内区半径为 r_1 ,外区为无限大边界;内外区具有不同的孔渗特性,内区水平方向和垂直方向渗透率分别为 k_{h_1} 及 k_{v_1} ,其孔隙度为 φ_1 ;而外区水平方向和垂直方向渗透率分别为 k_{h_2} 及 k_{v_2} ,其孔隙度为 φ_2 ;地层中心有一口水平井,井筒半径为 r_w ,长度为 $2L$,水平井与地层平行;气藏中的渗流为等温达西渗流;考虑表皮效应和井筒存储效应;忽略重力和毛管力的影响。

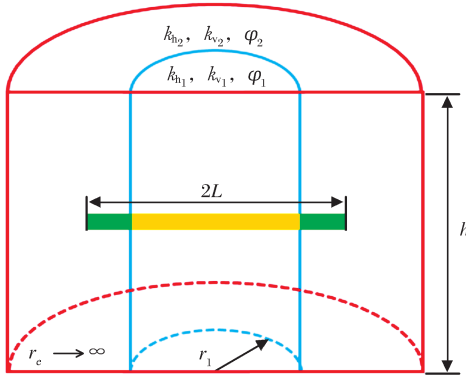


图1 穿透复合气藏内区水平井示意

Fig. 1 Schematic of horizontal well passing through inner region

1.2 数学模型

在直角空间坐标系中,由连续性方程、运动方程和气体状态方程得到气体渗流控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_h \frac{p}{\mu Z} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_h \frac{p}{\mu Z} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{p}{\mu Z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \varphi C_i \mu \frac{p}{\mu Z} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

为得到形式简单的渗流控制方程,引入拟压力:

$$\psi = 2 \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu Z} dp \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)并将其转化为径向柱坐标可得:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_h \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} k_h \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + k_v \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \varphi C_i \mu \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (3)$$

对于复合气藏水平井,由式(3)可得内区的渗流控制方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_{h_1} \frac{\partial \psi_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} k_{h_1} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial \theta^2} + k_{v_1} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial z^2} = \varphi_1 C_{i_1} \mu \frac{\partial \psi_1}{\partial t} \quad (0 \leq r \leq r_1) \quad (4)$$

同理,外区的渗流控制方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_{h_2} \frac{\partial \psi_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} k_{h_2} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial \theta^2} + k_{v_2} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial z^2} = \varphi_2 C_{i_2} \mu \frac{\partial \psi_2}{\partial t} \quad (r_1 \leq r \leq \infty) \quad (5)$$

点源在内区时的内边界条件:

$$\lim_{r \rightarrow 0} 2\pi r^2 \sqrt{k_{h_1} k_{v_1}} \frac{\partial \Delta \psi_1}{\partial r} = - \frac{p_{sc} T_{sc}}{T} \tilde{q} \quad (6)$$

点源在外区时的内边界条件:

$$\lim_{r \rightarrow 0} 2\pi r^2 \sqrt{k_{h_2} k_{v_2}} \frac{\partial \Delta \psi_2}{\partial r} = - \frac{p_{sc} T_{sc}}{T} \tilde{q} \quad (7)$$

内外区界面的连接条件:

$$\psi_1 = \psi_2, r = r_1 \quad (8)$$

$$k_{h_1} \frac{\partial \psi_1}{\partial r} = k_{h_2} \frac{\partial \psi_2}{\partial r}, r = r_1 \quad (9)$$

外边界条件:

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial z} = \frac{\partial \psi_2}{\partial z} = 0 \quad (z = 0 \text{ 或 } z = h) \quad (10)$$

$$\psi_2 = \psi_i, r = \infty \quad (11)$$

式(1)–(11)中: Z 为任意条件下的气体偏差因子; μ 为气体黏度,Pa·s; p 为地层压力,Pa; ψ 为拟压力,Pa/s; p_0 为参考压力,Pa; r 为半径,m; k_v 、 k_h 分别为水平方向和垂直方向的渗透率, m^2 ; φ 为孔隙度,%; C_i 为岩石综合压缩系数, Pa^{-1} ; p_{sc} 为标准状况下的压力,Pa; T_{sc} 为标准状况下的温度,K; \tilde{q} 为瞬时点源, m^3/s ;下标1、2分别表示内区、外区。

为方便研究复合气藏水平井不稳定渗流,引入如下无因次变量:

内外区无因次拟压力:

$$\psi_{D_1} = \frac{\pi k_{h_1} h T_{sc} (\psi_i - \psi_1)}{p_{sc} q T}$$

$$\psi_{D_2} = \frac{\pi k_{h_1} h T_{sc} (\psi_i - \psi_2)}{p_{sc} q T}$$

无因次时间:

$$t_D = \frac{k_{h_1} t}{\varphi_1 \mu C_1 L^2},$$

与长度和坐标有关的无因次量:

$$x_D = \frac{x}{L}, y_D = \frac{y}{L}, r_D = \frac{r}{L},$$

$$z_{D_1} = \frac{z}{L} \sqrt{\frac{k_{h_1}}{k_{v_1}}},$$

$$z_{D_2} = z_{D_1} \sqrt{\frac{k_{v_1}}{k_{h_1}} \frac{k_{h_2}}{k_{v_2}}},$$

$$h_{D_1} = \frac{h}{L} \sqrt{\frac{k_{h_1}}{k_{v_1}}},$$

$$h_{D_2} = h_{D_1} \sqrt{\frac{k_{v_1}}{k_{h_1}} \frac{k_{h_2}}{k_{v_2}}},$$

内外区流度比:

$$M = \left(\frac{k_h}{\mu}\right)_1 / \left(\frac{k_h}{\mu}\right)_2,$$

外区与内区弹性储容比

$$\omega = (\varphi C_1 \mu)_2 / (\varphi C_1 \mu)_1,$$

内外区导压系数比

$$\eta = \left(\frac{k_h}{\varphi \mu C_1}\right)_1 / \left(\frac{k_h}{\varphi \mu C_1}\right)_2$$

将无因次变量代入式(4)一式(11) 并进行拉普拉斯变换可得拉式空间下的渗流模型:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial \bar{\psi}_{D_1}}{\partial r_D} \right) + \frac{1}{r_D^2} \frac{\partial^2 \bar{\psi}_{D_1}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}_{D_1}}{\partial z_{D_1}^2} = u \bar{\psi}_{D_1} \quad (0 \leq r_D \leq r_{1D}) \quad (12)$$

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial \bar{\psi}_{D_2}}{\partial r_D} \right) + \frac{1}{r_D^2} \frac{\partial^2 \bar{\psi}_{D_2}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}_{D_2}}{\partial z_{D_2}^2} = \tilde{u} \bar{\psi}_{D_2} \quad (r_{1D} \leq r_D \leq \infty) \quad (13)$$

$$\lim_{r_D \rightarrow 0} \frac{4r_D^2 L}{h_{D_1}} \frac{\partial \bar{\psi}_{D_1}}{\partial r_D} = -\frac{1}{u} \quad (14)$$

$$\lim_{r_D \rightarrow 0} \frac{4r_D^2 L}{M h_{D_2}} \frac{\partial \bar{\psi}_{D_2}}{\partial r_D} = -\frac{1}{u} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \bar{\psi}_{D_1}}{\partial z_{D_1}} = \frac{\partial \bar{\psi}_{D_2}}{\partial z_{D_2}} = 0 \quad (16)$$

$$z_{D_i} = 0 \text{ 或 } z_{D_i} = h_{D_i}, i = 1, 2 \quad (16)$$

$$\bar{\psi}_{D_2} = 0, \quad r_D = \infty \quad (17)$$

$$\frac{\partial \bar{\psi}_{D_1}}{\partial r_D} = \frac{1}{M} \frac{\partial \bar{\psi}_{D_2}}{\partial r_D}, \quad r_D = r_{1D} \quad (18)$$

$$\bar{\psi}_{D_1} = \bar{\psi}_{D_2}, \quad r_D = r_{1D} \quad (19)$$

式(12)一(19)中: u 为拉式空间变量; $\tilde{u} = u\eta$; L 为参考长度, m, 本文取水平井半长为参考长度; q 为水平井产气量, m^3/s 。

2 模型求解

对于复合气藏水平井, 首先求取复合气藏中点源分别处于内区和外区时的拟压力分布。由虚宗量贝塞尔函数的性质结合 Muskat 方法和点源解^[16-17], 可得点源分别在外区和内区时的拟压力分布。

点源在外区时, 外区拟压力分布:

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_{D_{O_2}} = & \frac{M}{2Lu} \left[\sum_{k=-\infty}^{+\infty} I_k(\sqrt{u}r_D) K_k(\sqrt{u}r'_D) \right. \\ & \cos k(\theta - \theta') + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \cos n\pi \frac{z_{D_2}}{h_{D_2}} \cos n\pi \frac{z'_{D_2}}{h_{D_2}} \times \\ & \sum_{k=-\infty}^{+\infty} I_k(\tilde{\xi}_n r_D) K_k(\tilde{\xi}_n r'_D) \cos k(\theta - \theta') + \\ & \sum_{k=-\infty}^{+\infty} b_{k0} K_k(\sqrt{u}r_D) \cos k(\theta - \theta') + \\ & \left. 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \cos n\pi \frac{z_{D_2}}{h_{D_2}} \cos n\pi \frac{z'_{D_2}}{h_{D_2}} \times \right. \\ & \left. \sum_{k=-\infty}^{+\infty} b_{kn} K_k(\tilde{\xi}_n r_D) \cos k(\theta - \theta') \right] \quad (20) \end{aligned}$$

点源在外区时, 内区拟压力分布:

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_{D_{O_1}} = & \frac{M}{2Lu} \left[\sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_{k0} I_k(\sqrt{u}r_D) \cos k(\theta - \theta') + \right. \\ & \left. 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \cos n\pi \frac{z_{D_1}}{h_{D_1}} \cos n\pi \frac{z'_{D_1}}{h_{D_1}} \times \right. \\ & \left. \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_{kn} I_k(\xi_n r_D) \cos k(\theta - \theta') \right] \quad (21) \end{aligned}$$

式中: $\xi_n = \sqrt{u + \frac{n^2 \pi^2}{h_{D_1}^2}}$, $\tilde{\xi}_n = \sqrt{\tilde{u} + \frac{n^2 \pi^2}{h_{D_2}^2}}$ 。

结合内外区界面的连接条件式(18)、式(19) 可得:

$$I_k(\xi_n r'_D) K_k(\xi_n r_D) + a_{kn} I_k(\xi_n r_D) = b_{kn} K_k(\tilde{\xi}_n r_D) \quad (22)$$

$$\xi_n I_k(\xi_n r'_D) K'_k(\xi_n r_D) + a_{kn} \xi_n I'_k(\xi_n r_D) = \frac{b_{kn}}{M} \tilde{\xi}_n K'_k(\tilde{\xi}_n r_D) \quad (23)$$

$$\frac{b_{kn}}{M} \tilde{\xi}_n K'_k(\tilde{\xi}_n r_D) \quad (23)$$

解式(22) 和式(23) 得:

$$a_{kn} = \frac{1}{r_{1D}} A_{kn} K_k(\tilde{\xi}_n r'_D) \quad (24)$$

$$b_{kn} = -B_{kn} K_k(\tilde{\xi}_n r'_D) \quad (25)$$

式中: $A_{kn} =$

$$\frac{1}{M\xi_n I'_k(\xi_n r_{1D})K_k(\tilde{\xi}_n r_{1D}) - \tilde{\xi}_n I_k(\xi_n r_{1D})K'_k(\tilde{\xi}_n r_{1D})}$$

$$B_{kn} =$$

$$\frac{M\xi_n I'_k(\xi_n r_{1D})I_k(\tilde{\xi}_n r_{1D}) - \tilde{\xi}_n I_k(\xi_n r_{1D})I'_k(\tilde{\xi}_n r_{1D})}{M\xi_n I'_k(\xi_n r_{1D})K_k(\tilde{\xi}_n r_{1D}) - \tilde{\xi}_n I_k(\xi_n r_{1D})K'_k(\tilde{\xi}_n r_{1D})}$$

将式(24)、式(25)分别带入式(20)、式(21),可得点源在外区时内外两区的拟压力分布 $\bar{\psi}_{DO_1}$ 、 $\bar{\psi}_{DO_2}$ 。

同理可以得到,点源在内区时内外两区的拟压力分布。

点源在内区时,外区拟压力分布:

$$\bar{\psi}_{DI_2} = \frac{M}{2Lu} \left[\sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_{k0} K_k(\sqrt{u} r_D) \cos k(\theta - \theta') + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \cos n\pi \frac{z_{D_2}}{h_{D_2}} \cos n\pi \frac{z'_{D_2}}{h_{D_2}} \times \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_{kn} K_k(\tilde{\xi}_n r_D) \cos k(\theta - \theta') \right] \quad (26)$$

点源在内区时,内区拟压力分布:

$$\bar{\psi}_{DI_1} =$$

$$\frac{1}{2Lu} \left[\sum_{k=-\infty}^{+\infty} I_k(\sqrt{u} r'_D) K_k(\sqrt{u} r_D) \cos k(\theta - \theta') + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \cos n\pi \frac{z_{D_1}}{h_{D_1}} \cos n\pi \frac{z'_{D_1}}{h_{D_1}} \times \sum_{k=-\infty}^{+\infty} I_k(\xi_n r'_D) K_k(\xi_n r_D) \cos k(\theta - \theta') + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_{k0} I_k(\sqrt{u} r_D) \cos k(\theta - \theta') + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \cos n\pi \frac{z_{D_1}}{h_{D_1}} \cos n\pi \frac{z'_{D_1}}{h_{D_1}} \times \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_{kn} I_k(\xi_n r_D) \cos k(\theta - \theta') \right] \quad (27)$$

式中: $c_{kn} = -C_{kn} I_k(\xi_n r'_D)$;

$$d_{kn} = \frac{M}{r_{1D}} D_{kn} I_k(\xi_n r'_D);$$

$$C_{kn} =$$

$$\frac{M\xi_n K'_k(\xi_n r_{1D})K_k(\tilde{\xi}_n r_{1D}) - \tilde{\xi}_n K_k(\xi_n r_{1D})K'_k(\tilde{\xi}_n r_{1D})}{M\xi_n I'_k(\xi_n r_{1D})K_k(\tilde{\xi}_n r_{1D}) - \tilde{\xi}_n I_k(\xi_n r_{1D})K'_k(\tilde{\xi}_n r_{1D})};$$

$$D_{kn} = A_{kn}。$$

在求得点源分别在内区和外区时的拟压力之后,将点源关于 r' 从 $-L_h/2$ 积分到 $L_h/2$ 获得复合气藏中心一口水平井的压力分布。

定义新的无因次变量及参考长度,如下:

$$z_D = \frac{z}{h}, C_D = \frac{C}{2\pi\phi_1 C_{1r} h r_w^2}, L = \frac{L_h}{2}$$

水平井未穿透内区时,拟压力在内外两区的分布如下:

$$\bar{\psi}_{HDI_1} = \frac{1}{2u} \int_{-1}^1 IN_1 |_{\theta=0} dr'_D, r_D < r_{1D} \quad (28)$$

$$\bar{\psi}_{HDI_2} = \frac{1}{2u} \int_{-1}^1 IN_2 |_{\theta=0} dr'_D, r_{1D} < r_D < \infty \quad (29)$$

式中: $IN_1 = 2Lu \times \bar{\psi}_{DI_1}$, $IN_2 = 2Lu \times \bar{\psi}_{DI_2}$ 。

水平井穿透内区时,拟压力在内外两区的分布如下:

$$\bar{\psi}_{HDO_1} = \frac{1}{2u} \left(\int_{-1}^{-r_{1D}} OU_1 |_{\theta=0} dr'_D + \int_{-r_{1D}}^{r_{1D}} IN_1 |_{\theta=0} dr'_D + \int_{r_{1D}}^1 OU_1 |_{\theta=0} dr'_D \right) \quad (30)$$

$$\bar{\psi}_{HDO_2} = \frac{1}{2u} \left(\int_{-1}^{-r_{1D}} OU_2 |_{\theta=0} dr'_D + \int_{-r_{1D}}^{r_{1D}} IN_2 |_{\theta=0} dr'_D + \int_{r_{1D}}^1 OU_2 |_{\theta=0} dr'_D \right) \quad (31)$$

式中: $OU_1 = 2Lu \times \bar{\psi}_{DO_1}$, $OU_2 = 2Lu \times \bar{\psi}_{DO_2}$ 。

采用积分平均法对压力参考点进行处理,从而得到井底拟压力。

水平井未穿透内区时,井底拟压力表示为:

$$\bar{\psi}_{wD} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \bar{\psi}_{HDI_1} |_{\theta=0} dr_D \quad (32)$$

水平井穿透内区时,井底拟压力表示为:

$$\bar{\psi}_{wD} = \frac{1}{2} \left(\int_{-1}^{-r_{1D}} \bar{\psi}_{HDO_2} |_{\theta=0} dr_D + \int_{-r_{1D}}^{r_{1D}} \bar{\psi}_{HDO_1} |_{\theta=0} dr_D + \int_{r_{1D}}^1 \bar{\psi}_{HDO_2} |_{\theta=0} dr_D \right) \quad (33)$$

对于式(32)和式(33)井筒井壁处有:

$$z_D = z_{wD} + \frac{r_w}{h}。$$

当考虑井筒存储系数和表皮效应时,利用杜哈美原理可得^[18]:

$$\bar{\psi}_{wD}(S, C_D) = \frac{u \bar{\psi}_{wD} + S/2L_D}{u + r_{wD}^2 C_D u^2 [u \bar{\psi}_{wD} + S/2L_D]} \quad (34)$$

Van-Everdingen 等^[18]研究表明,在 Laplace 空间下定井底流压生产时的无因次产量,可以通过定产量生产时井底拟压力值得到,两者满足以下关系:

$$\bar{q}_D = \frac{1}{u^2 \bar{\psi}_{wD}} \quad (35)$$

利用 Stehfest 数值反演方法^[19],即可得到真实空间的不稳定产量解。

3 典型压力图版

根据本文建立的模型,绘制双对数坐标下的复合气藏水平井拟压力图版(图 2,图 3)。初始参数为:无因次井筒存储系数 $C_D = 10$,表皮系数 $S = 2$,内外区垂向渗透率与水平方向渗透率比值 $k_{vh_1} = k_{vh_2} = 0.1$,水平井长度 $L_h = 500\text{m}$,外区与内区储容比 $\omega = 1$ 。

由无因次内区半径 r_{iD} 定义知:图 2 中 $r_{iD} = 8.0$ 时为水平井未穿透内区的情况, $r_{iD} = 1.0$ 时为水平井长度与内区直径相同的情况, $r_{iD} = 0.2$ 时为水平井穿透内区的情况。而图 3 中均取 $r_{iD} = 0.5$,拟压力动态曲线均为水平井穿透内区的情况。

由图 2 可以看出:水平井未穿透内区时,水平井拟压力动态可以分为 7 个阶段(图 2 中 $r_{iD} = 8.0$ 的情况):①早期纯井筒存储阶段;②纯井筒存储阶段与垂向径向流之间的过渡段;③垂向径向流阶段;④垂向径向流与内区水平拟径向流之间的过渡段;⑤内区水平拟径向流阶段,该阶段拟压力导数为 0.5 水平线;⑥内区水平拟径向流与内外区整体水平拟径向流间的过渡段;⑦内外区整体水平拟径向流阶段。

对比分析图 2、图 3 可知:考虑水平井穿透内区后,内区水平拟径向流消失,此时水平井拟压力动态可以分为 5 个阶段(图 3):①早期纯井筒存储阶段;②纯井筒存储阶段与垂向径向流之间的过渡段;③垂向径向流阶段;④垂向径向流与内外区整体水平拟径向流之间的过渡段;⑤内外区整体水平拟径向流阶段,该阶段压力导数为水平线,水平段取值与内外区流度比有关。

4 产能影响因素分析

根据本文的模型,绘制横坐标为无因次时间与无因次井筒存储系数比值,纵坐标为无因次产量的

双对数复合气藏水平井无因次产能曲线。并分析无因次内区半径 r_{iD} ,表皮系数 S ,内外区流度比 M ,外区与内区储容比 ω 对水平井产能的影响。相关参数取值为:无因次井筒存储系数 $C_D = 10$,内外区垂向渗透率与水平方向渗透率比值 $k_{vh_1} = k_{vh_2} = 0.1$,水平井长度 $L_h = 500\text{m}$ 。

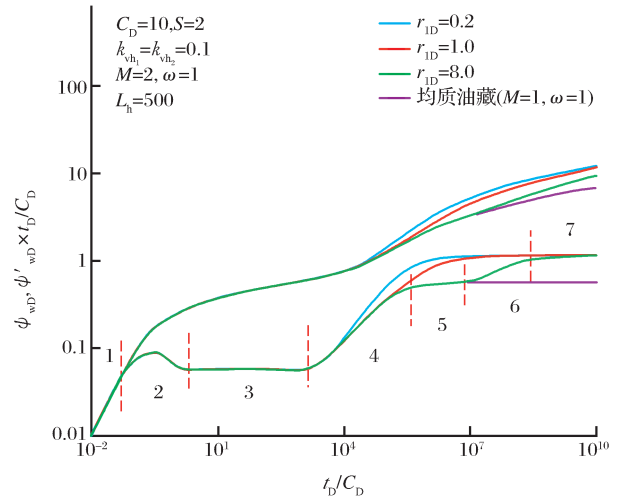


图 2 不同内区半径下复合气藏水平井典型拟压力图版
Fig. 2 Type curve of pseudopressure distribution for different inner region radius

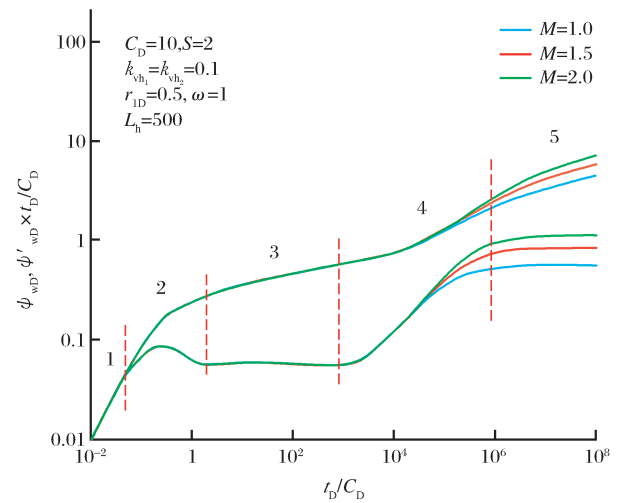


图 3 水平井穿透复合气藏内区的典型拟压力图版 ($r_{iD} = 0.5$)

Fig. 3 Type curve of pseudopressure distribution for horizontal well passing through inner region ($r_{iD} = 0.5$)

4.1 无因次内区半径 r_{iD} 的影响

取内外区流度比 $M = 2$,外区与内区的储容比 $\omega = 0.3$,此时内区的孔渗性质好于外区,分析无因次内区半径 r_{iD} 对水平井产能的影响(图 4)。另外,取内外区流度比 $M = 0.5$,外区与内区的储容比 $\omega =$

3. 此时外区的孔渗性质好于内区, 分析无因次内区半径对水平井产能的影响(图 5)。

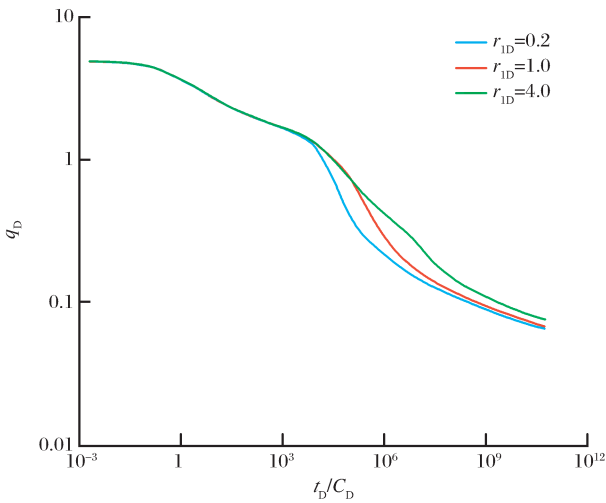


图 4 无因次内区半径对产能的影响(内区孔渗性质好)
Fig. 4 Effect of dimensionless inner region radius on the rate when the inner region formation parameters are better

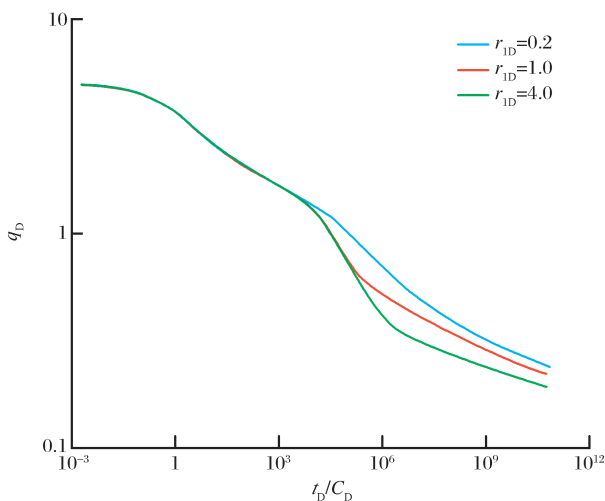


图 5 无因次内区半径对产能的影响(外区孔渗性质好)
Fig. 5 Effect of dimensionless inner region radius on the rate when the outer region formation parameters are better

当 $r_{ID} > 1$ 时表明水平井未穿透内区; 而 $r_{ID} < 1$ 表明水平井穿透内区。由此, 对比图 4 和图 5 可以看出: 无因次内区半径 r_{ID} 对水平井的产能的影响, 主要体现在中后期, 并且受内外区孔渗性质的影响。当内区孔渗性质好于外区时(图 4), 无因次内区半径 r_{ID} 越大, 中后期的无因次产量越高; 当外区孔渗性质好于内区时(图 5), 无因次内区半径 r_{ID} 越大, 中后期的无因次产量越低。这是因为中后期产量受外区影响较大, 当内区孔渗性质好于外区时, 流体流动能力在外区的影响下变差, r_{ID} 越大, 内区相对水

平井长度越大, 外区对产量的影响相对变小, 因而 r_{ID} 越大中后期无因次产量越大; 相反, 当外区孔渗性质好于内区时, 流体流动能力在外区的影响下提高, 而 r_{ID} 越大, 内区相对水平井长度越大, 外区对产量的影响相对变小, 因而 r_{ID} 越大中后期无因次产量越小。

4.2 表皮系数 S 对产能的影响

取外区与内区的储容比 $\omega = 0.5$, 内外区流度比 $M = 0.5$, 无因次内区半径 $r_{ID} = 0.5$, 分析表皮系数 S 对水平井产能的影响(图 6)。

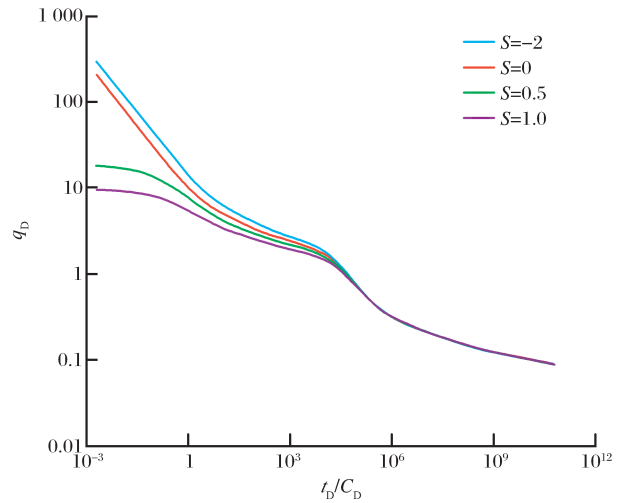


图 6 表皮系数对产能的影响

Fig. 6 Effect of skin factor on the rate

由图 6 可知表皮系数主要影响早期产量。表皮系数越大, 水平井早期产量越低, 而表皮系数对生产后期的产量几乎没有影响。这是因为表皮系数越大, 气体渗流阻力越大, 生产前期水平井产量越低; 随着生产时间的延长, 压力波不断向外传播, 表皮系数对波及区内储层渗透能力的影响逐渐减弱, 因此表皮系数对中后期无因次产量几乎没有影响。

4.3 内外区流度比 M 的影响

取外区与内区的储容比 $\omega = 0.5$, 无因次内区半径 $r_{ID} = 0.5$, 分析内外区流度比 M 对水平井产能的影响(图 7)。

由图 7 可知内外区流度比 M 主要影响中后期产量, 对早期产量几乎没有影响。随着 M 的增大, 中后期无因次产量减小。这是因为水平井穿透内区后, 生产前期产量受内区影响较大, 随着压力波的不断传播, 外区对产量的影响逐渐增大, 而 M 增大表明外区渗透性相对内区变差, M 越大表明中后期流体的流动能力在外区的影响下变得越差, 因而中后期产量越低。

4.4 外区与内区储容比 ω 的影响

取内外区流度比 $M=1.5$, 无因次内区半径 $r_{1D}=0.5$, 分析外区与内区储容比 ω 对水平井产能的影响(图8)。

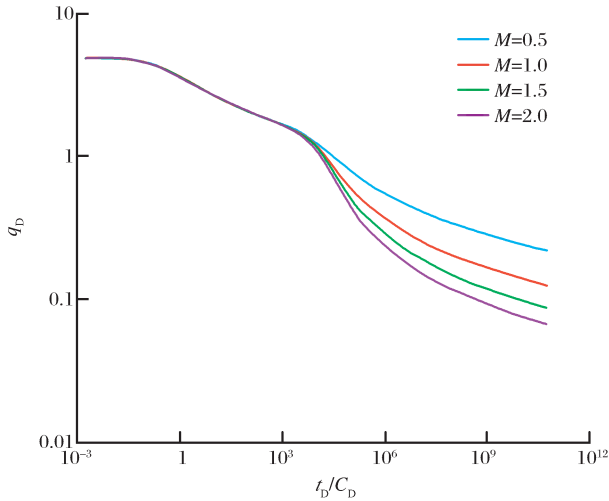


图7 内外区流度比对产能的影响

Fig. 7 Effect of mobility ratio on the rate

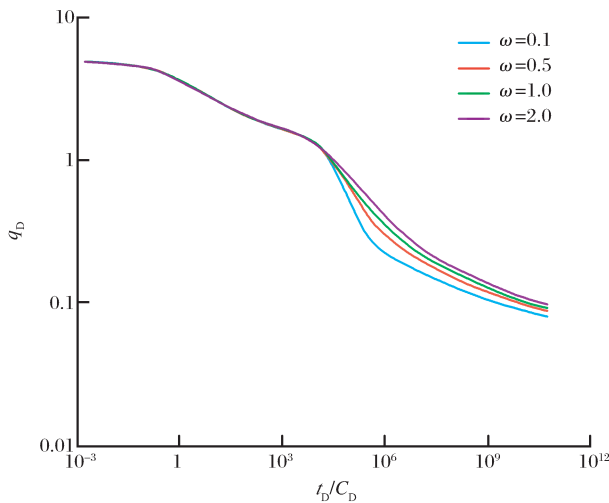


图8 外区与内区储容比对产能的影响

Fig. 8 Effect of storativity ratio on the rate

由图8可知,随着 ω 的增大,中后期产量逐渐增大。 ω 增大表明外区的储容能力相对内区增大,而中后期产量受外区影响较大,外区储容能力越大,中后期产量越高。

5 结论

(1)建立了考虑穿透复合气藏内区的水平井产能分析新模型,采用拉普拉斯变换、Muskat方法和点源函数叠加的方法求解出了定产量下的拟压力解,并由此得到了复合气藏水平井穿透内区的不稳

定产量解。

(2)绘制了水平井穿透内区时的无因次产能曲线,并分析了无因次内区半径、内外区流度比、外区与内区储容比、表皮系数对水平井产能的影响。

(3)通过对无因次产能曲线的分析认识到流度比、储容比、无因次内区半径对水平井产能的影响主要体现在生产的中后期,而表皮系数的影响主要体现在早期。特别的是,受内外区孔渗性质差异的影响,无因次内区半径对水平井产能的影响会呈现出相反的规律。

参考文献(References):

- [1] Joshi S D. Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells[J]. Journal of Petroleum Technology, 1988, 40(6): 729-739.
- [2] Babu D K, Odeh A S. Productivity of a horizontal well[J]. SPE Reservoir Engineering, 1989, 4(4): 417-421.
- [3] Dikken B J. Pressure drops in horizontal wells and its effect on production performance[J]. Journal of Petroleum Engineers, 1990, 42(11): 1426-1433.
- [4] Yuan Lin, Li Xiaoping, Zhang Lu, et al. Analysis and correlation of steady-state productivity formulas for horizontal wells[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(6): 127-132. [袁淋, 李晓平, 张璐, 等. 水平井稳态产能公式对比与分析[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(6): 127-132.]
- [5] Fan Zifei. Study for horizontal well's productivity formula in bottom-water drive reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(1): 71-75, 81. [范子菲. 底水驱动油藏水平井产能公式研究[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(1): 71-75, 81.]
- [6] Chen Zhihai, Ma Xinfang, Lang Zhaoxin. Deliverability prediction of horizontal gas well[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(2): 98-99. [陈志海, 马新仿, 郎兆新. 气藏水平井产能预测方法[J]. 天然气工业, 2006, 26(2): 98-99.]
- [7] Zhang Jing, Hu Yongle, Ran Qiquan, et al. Comprehensive research on the productivity and pressure loss of horizontal well in gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(1): 157-162. [张晶, 胡永乐, 冉启全, 等. 气藏水平井产能及水平段压力损失综合研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(1): 157-162.]
- [8] Xiong Jun, He Hanping, Xiong Youming, et al. Production prediction of partially completed horizontal well in gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2): 286-290. [熊军, 何汉平, 熊友明, 等. 气藏水平井分段完井产能预测[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(2): 286-290.]
- [9] Liu Xiangping. A new model of calculating steady state productivity of the horizontal well in gas reservoir[J]. Nature Gas Industry, 1998, 18(1): 51-54, 9. [刘想平. 气藏水平井稳态产能计算新模型[J]. 天然气工业, 1998, 18(1): 51-54, 9.]
- [10] Jiang Houshun, Bai Yanhua, Ran Jianli. Prediction of horizon-

- tal well deliverability and optimization of perforation parameters[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(6): 891-893. [江厚顺, 白彦华, 冉建立. 水平井产能预测及射孔参数优选系统研究[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(6): 891-893.]
- [11] Jiang Kai, He Zhixiong, Li Min, *et al.* Analysis on transient deliverability of horizontal gas wells[J]. *Fault-block Oil & Gas Field*, 2010, 17(6): 738-740, 744. [蒋开, 何志雄, 李闽, 等. 水平气井不稳定产能分析[J]. *断块油气田*, 2010, 17(6): 738-740, 744.]
- [12] Chen C C, Raghavan R. Supplement to SPE 28393, Modelling a Fractured Well in a Composite Reservoir[R]. Society of Petroleum Engineers. SPE 35470, 1995.
- [13] Ambastha A K, Ghaffari K. A numerical investigation of pressure transient analysis for horizontal wells in composite reservoirs mimicking thermal recovery situations[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1998, 37(3): 25-30.
- [14] Wang Xiaodong, Liu Ciqun. Pressure analysis for horizontal wells in composite reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1997, 18(2): 72-77. [王晓冬, 刘慈群. 复合油藏中水平井压力分析[J]. *石油学报*, 1997, 18(2): 72-77.]
- [15] Shi Guoxin, Nie Renshi, Lu Jianguo, *et al.* Well test model of horizontal well in 2-zoned composite reservoir and example interpretation[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2012, 34(5): 99-106. [石国新, 聂仁仕, 路建国, 等. 2区复合油藏水平井试井模型与实例解释[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2012, 34(5): 99-106.]
- [16] Gringarten A C, Ramey H J. The use of source and Green's function in solving unsteady-flow problems in reservoirs[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1973, 13(5): 285-296.
- [17] Ozkan E. New Solutions for Well-test-analysis Problems: Part III-additional Algorithms[R]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 25-28 September, New Orleans, Louisiana. SPE 28424, 1994.
- [18] Van-Everdingen A F, Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problem in reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1949, 1(12): 305-324.
- [19] Tong Dengke, Chen Qinlei. Some annotation about Stehfest method of Laplace numerical inversion[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(6): 91-92. [同登科, 陈钦雷. 关于 Laplace 数值反演 Stehfest 方法的一点注记[J]. *石油学报*, 2001, 22(6): 91-92.]

Rate Transient Analysis for Horizontal Well Passing through Inner Region of Composite Gas Reservoir

JIANG Rui-zhong¹, GAO Yi-hua¹, SUN Zhao-bo², TENG Wen-chao¹, QIAO Xin¹, LI Yuan¹
 (1. *School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China*;
 2. *China National Offshore Oil Corporation (CNOOC) Limited Tianjin Branch, Tianjin 300452, China*)

Abstract: In the process of gas reservoir development, a composite reservoir may be formed due to acidification, formation pollution or reservoir geological characteristics. An unsteady flow mathematical model is established for horizontal well passing through the inner region of the composite gas reservoir, and the rate transient analysis (RTA) is also conducted. In order to solve the problem, Laplace transform, Muskat method, the superposition of point source and the principle of Duhamel are used to get the transient pseudopressure of horizontal well. On the basis of the transient pseudopressure, the transient rate of horizontal well in real space is obtained by the Stehfest numerical inversion method. The dimensionless rate curves are plotted, and the effects of the dimensionless inner area radius, skin factor, the mobility ratio, the storativity ratio on the dimensionless rate of horizontal well passing through the inner region are analyzed.

Key words: Composite gas reservoir; Horizontal well; Passing through the inner region; Rate transient analysis; Dimensionless rate curve