

# 多层复合油藏试井解释模型建立

吴浩君,姜永,王迪

中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院 天津 300450

通讯作者:Email:wuhj8@cnoc.com.cn

项目支持:“十三五”重大专项示范工程“海上油田化学驱合理井网井距及剩余油量描述技术研究”(2016ZX05058001-007)

引用:吴浩君,姜永,王迪. 多层复合油藏试井解释模型建立[J]. 油气井测试,2019,28(3):1-6.

Cite: WU Haojun, JIANG Yong, WANG Di. Foundation of well test interpretation model for composite reservoirs with multi-layers [J]. Well Testing, 2019,28(3):1-6.

**摘要** 油藏开发过程中,多层非均质油藏呈现与单层均质油藏的不同特性,层间及平面物性差异会对产量的贡献及压力衰竭程度造成影响。本文从渗流力学基本理论出发,建立了多层复合油藏试井解释模型,通过 Laplace 变换和 Stehfest 数值反演对模型进行求解,获得典型试井分析样板曲线,对反映储层特征的参数敏感性进行分析。结果表明,无层间窜流的多层复合渗流模型表现出压力导数曲线存在反映复合物性变化的“台阶”型;每个层的复合变化不同会引起压力导数出现多个“台阶”。试井解释时,应区别储层物性变化或不渗透边界造成的压力导数曲线上翘。该模型可以对多层合采且储层平面存在变化的复合油藏进行评价,获取多层合采复合油藏各分层渗透率、表皮系数、地层压力、边界等参数信息,为该类储层描述和开发规律提供指导及理论依据。

**关键词** 多层复合油藏;试井解释模型;压力导数曲线;储层物性;渗流特征**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:A **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.03.001

## Foundation of well test interpretation model for composite reservoirs with multi-layers

WU Haojun, JIANG Yong, WANG Di

Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd, Tianjin 300459, China

**Abstract:** During the reservoir development process, the multi-layer heterogeneous reservoirs exhibit different characteristics from the single-layer homogeneous reservoirs. This difference was mainly reflected in the influence of the difference in interlayer and plane physical properties on the yield and the degree of stress failure. Based on the basic theory of seepage mechanics, a well test interpretation model for multi-layer composite reservoirs was established. The Laplace transform and Stehfest numerical inversion were used to solve this model, and then the pattern curve of typical well test analysis can be obtained to analyze the sensitivity of the parameters which reflect the reservoir characteristics. The results showed that the multi-layer composite seepage model without interlayer turbulence can reflect the change of composite properties. The main feature was that the pressure derivative curve would have a “step” shape, and the difference of the composite changes of each layer would cause the pressure derivative to appear multiple “steps”. During the interpretation of well test, the upwarping of the pressure derivative curve caused by the reservoir physical property change or the impermeable boundary should be distinguished. The model can evaluate the composite reservoirs with commingling production and changes in reservoir plane, and obtain the parameters such as permeability, skin factor, formation pressure and boundary of each layer of composite reservoir commingling production, which can provide guidance and theoretical basis for reservoir description and development rules.

**Keywords:** multi-layer composite reservoir; well test interpretation model; pressure derivative curve; reservoir physical property; seepage characteristics

试井分析是认识油气藏、评价油气藏的重要手段。应用试井分析方法可以确定油气藏的储层物性特征、油气藏边界、压力系统、储量预测以及生产能力等。近些年我国越来越多的中深层多层系油藏投入开发,各个油层纵向上的物性差异较大,平

面非均质性也较强,对储层刻画和开发调整带来了巨大的困难。关于多层和复合油藏试井解释方法国内外许多学者开展了相关研究工作。早期, Lefkovits H. C.等<sup>[1]</sup>研究了层间无窜流、井底总产量恒定情况下的多层油藏渗流模型,获得解析解。

Loucks T. L.等<sup>[2]</sup>研究了复合油藏渗流模型,并用拉式变换求解井底压力。随后,Lolon E. P.等<sup>[3]</sup>针对多层油藏渗流模型,研究了半解析方法求解井底压力。Kuchuk F.J.等<sup>[4]</sup>采用解析方法求解了多层油藏复合渗流模型。此外,Huang R.J.<sup>[5]</sup>利用边界元法求解了多层有窜流模型的井底压力解。Zhang L.H.等<sup>[6]</sup>应用拉普拉斯和傅里叶变换求解了两区线性复合模型的压力解析解。齐与峰等<sup>[7]</sup>求得不同边界条件下的多层油藏模型的解析解。刘义坤等<sup>[8]</sup>对均质两区复合模型进行了分析。曾萍等<sup>[9]</sup>研究了两区复合油藏模型的半对数分析方法。王晓冬等<sup>[10]</sup>研究了两区复合油藏水平井模型及其压力特征。张望明等<sup>[11]</sup>研究了各层物性参数和孔隙体积差异在压恢曲线上的反应。廖新维等<sup>[12]</sup>研究了考虑交接面附加阻力的复合油藏试井模型。刘军等<sup>[13]</sup>计算了多层气藏模型中各小层平均压力及其变化规律。此外,李顺初等<sup>[14-15]</sup>、霍进等<sup>[16]</sup>、杨秀祥等<sup>[17]</sup>、高杰等<sup>[18]</sup>、陈仲良等<sup>[19]</sup>也对多层非均质油藏试井做了大量研究。针对实际油田开发中的压力变化特征,为了更好地掌握地层渗流动态信息,本文考虑地层纵向及平面非均质性参数的定量表征,建立了多层复合油藏试井解释模型,分析了压力曲线特征及敏感性参数的影响,将油藏模式和地层参数相结合,为更好地认识该类油气藏的储层描述和渗流规律提供指导及理论依据。

## 1 多层复合油藏试井模型

针对纵向上分为多层,平面上存在复合带的油藏模式,建立相应的模型并进行计算求解,进行该类油藏的试井解释。

### 1.1 物理模型

与常规单层砂岩油藏不同,随着油藏埋深的增加,储层纵向和平面的非均质性愈加明显,表现为纵向多层平面复合的特征,层与层之间往往存在隔层。当多层合采时,层间不存在干扰,且受储层非均质影响,每层的储层物性变化而呈两区复合特性。其物理模型如图1所示。模型基本假设为:①流体在多孔介质中的渗流过程符合达西定律;②底层水平等候且上下具有良好隔层;③忽略重力和毛管力的影响;④流动过程为等温渗流,无物理和化学变化发生;⑤考虑井筒储存效应和表皮效应的影响。

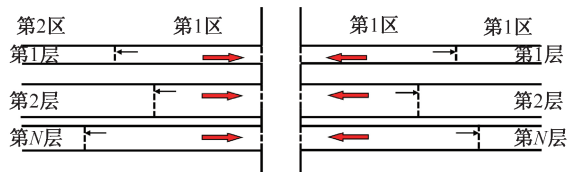


图1 无层间窜流多层合采两区复合油藏物理模型示意图  
Fig.1 Physical model of two areas of composite reservoir without layers interflow and with multi-layer commingled production

### 1.2 无因次数学模型

基于假设条件,建立多层合采两区复合油藏无因次数学模型<sup>[20]</sup>。

定义无因次量:

$$\begin{aligned} r_D &= \frac{r}{r_w e^{-S}}, \quad t_D = \frac{3.6K}{\phi C_{\mu} \mu r_w^2} t \\ p_{Dj} &= \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q \mu B} (p_i - p_j) \\ C_D &= \frac{C}{2\pi \phi h C_{\mu} r_w^2}, \quad q_{Dj} = \frac{q_j B_j}{q B} \\ M &= \frac{K_1 \mu_2}{K_2 \mu_1}, \quad \omega = \frac{\phi_1 C_{11}}{\phi_2 C_{12}} \end{aligned}$$

式中: $r$ 为距井中心的距离,m; $r_w$ 为井筒半径,m; $S$ 为表皮系数; $K$ 为地层渗透率,D; $h$ 为地层厚度,m; $\mu$ 为原油黏度,mPa·s; $\phi$ 为地层孔隙度,无因次; $C_{\mu}$ 为综合压缩系数,MPa<sup>-1</sup>; $t$ 为时间,h; $h$ 为地层厚度,m; $q$ 为油井井底产量,m<sup>3</sup>/d; $B$ 为原油体积系数,无因次; $p_i$ 为原始地层压力,MPa; $p_j$ 为第 $j$ 层的井底压力,MPa; $C$ 为井储系数,m<sup>3</sup>/MPa; $r_D$ 为无因次半径; $t_D$ 为无因次时间; $p_{Dj}$ 为第 $j$ 层的无因次压力; $C_D$ 为无因次井储系数; $q_{Dj}$ 为第 $j$ 层的无因次产量; $M$ 为内区和外区的流量比; $\omega$ 为内区和外区的储能比。

第 $j$ 层的内区渗流方程:

$$\frac{\partial^2 p_{j,1D}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_{j,1D}}{\partial r_D} = e^{-2S_j} \frac{\partial p_{j,1D}}{\partial t_D} \quad (j=1,2,\dots,N; 1 \leq r_D < r_{j,CD}) \quad (1)$$

第 $j$ 层的外区渗流方程:

$$\frac{\partial^2 p_{j,2D}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_{j,2D}}{\partial r_D} = e^{-2S_j} \frac{\omega_j}{M_j} \frac{\partial p_{j,2D}}{\partial t_D} \quad (j=1,2,\dots,N; r_{j,CD} < r_D < r_{eD}) \quad (2)$$

初始条件:

$$p_{j,1D}(r_D, 0) = p_{j,2D}(r_D, 0) = 0 \quad (j=1,2,\dots,N) \quad (3)$$

定产量生产内边界条件:

$$C_D \frac{\partial p_{wD}}{\partial t_D} - \sum_{j=1}^N K_j \left( \frac{\partial p_{j,1D}}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} = 1 \quad (4)$$

$$p_{\text{wD}} = \left[ p_{\text{jD}} - S_j \left( r_{\text{D}} \frac{\partial p_{\text{jD}}}{\partial r_{\text{D}}} \right) \right]_{r_{\text{D}}=1}$$

$(j = 1, 2, \cdots, N) \quad (5)$

两个区之间的界面连接条件:

压力连续:

$$p_{j,1\text{D}}(r_{j,\text{CD}},t_{\text{D}}) = p_{j,2\text{D}}(r_{j,\text{CD}},t_{\text{D}})$$

$(j = 1, 2, \cdots, N) \quad (6)$

流量连续:

$$\frac{\partial p_{j,1\text{D}}}{\partial r_{\text{D}}}(r_{j,\text{CD}},t_{\text{D}}) = \frac{1}{M_j} \frac{\partial p_{j,2\text{D}}}{\partial r_{\text{D}}}(r_{j,\text{CD}},t_{\text{D}})$$

$(j = 1, 2, \cdots, N) \quad (7)$

外边界条件:

①无限大边界:

$$p_{\text{D}}(\infty,t) = 0$$

$(8)$

②圆形定压边界:

$$p_{\text{D}}(r_{\text{eD}},t) = 0$$

$(9)$

③圆形封闭边界:

$$\frac{\partial p_{\text{D}}(r_{\text{eD}},t)}{\partial r_{\text{D}}} = 0$$

$(10)$

1.3 数学模型求解

对上述模型进行拉普拉斯变换,即

$$\bar{p}_{\text{jD}}(r_{\text{D}},z) = \int_0^\infty e^{-St_{\text{D}}} p_{\text{jD}}(r_{\text{D}},t_{\text{D}}) dt_{\text{D}}$$

则拉普拉斯空间下的数学模型为:

$$\frac{d^2 \bar{p}_{j,1\text{D}}}{dr_{\text{jD}}^2} + \frac{1}{r_{\text{D}}} \frac{d \bar{p}_{j,1\text{D}}}{dr_{\text{D}}} = z e^{-2S_j \bar{p}_{j,1\text{D}}}$$

$(j = 1, 2, \cdots, N; 1 \leq r_{\text{D}} < r_{j,\text{CD}}) \quad (11)$

第  $j$  层的外区的渗流方程:

$$\frac{d^2 \bar{p}_{j,2\text{D}}}{dr_{\text{D}}^2} + \frac{1}{r_{\text{D}}} \frac{d \bar{p}_{j,2\text{D}}}{dr_{\text{D}}} = e^{-2S_j} \frac{z \omega_j}{M_j} \bar{p}_{j,2\text{D}}$$

$(j = 1, 2, \cdots, N; r_{j,\text{CD}} < r_{\text{D}} < r_{\text{De}}) \quad (12)$

定产量生产内边界条件:

$$C_{\text{D}} z \bar{p}_{\text{wD}} - \sum_{j=1}^N K_j \left( \frac{d \bar{p}_{j,1\text{D}}}{dr_{\text{D}}} \right)_{r_{\text{D}}=1} = \frac{1}{z}$$

$(13)$

$$\bar{p}_{\text{wD}} = \left[ \bar{p}_{\text{jD}} - S_j \left( r_{\text{D}} \frac{d \bar{p}_{\text{jD}}}{dr_{\text{D}}} \right) \right]_{r_{\text{D}}=1}$$

$(j = 1, 2, \cdots, N) \quad (14)$

两个区之间的界面连接条件:

压力连续:

$$\bar{p}_{j,1\text{D}} = \bar{p}_{j,2\text{D}}$$

$(15)$

流量连续:

$$\frac{d \bar{p}_{j,1\text{D}}}{dr_{\text{D}}} = \frac{1}{M_j} \frac{d \bar{p}_{j,2\text{D}}}{dr_{\text{D}}}$$

$(16)$

外边界条件:

①无限大边界:

$$\bar{p}_{\text{D}}(\infty,z) = 0$$

$(17)$

②圆形定压边界:

$$\bar{p}_{\text{D}}(r_{\text{eD}},z) = 0$$

$(18)$

③圆形封闭边界:

$$\left. \frac{d \bar{p}_{\text{D}}}{dr_{\text{D}}} \right|_{r_{\text{D}}=r_{\text{eD}}} = 0$$

$(19)$

由式(11)~(19)可得出无层间窜流合采两区复合油藏渗流数学模型考虑定井筒储集效应的解,再利用 Stehfest 数值反演可求出实空间解。其中,Stehfest 拉普拉斯数值反演变换算法为

$$p_{\text{wD}}(t) = \frac{\ln 2}{t} \sum_{i=1}^N v_i \bar{p}_{\text{wD}}(z_i)$$

$(20)$

其中

$$z_i = (\ln 2/t) i$$

$(21)$

$$v_i = (-1)^{i+N/2} \sum_{k=(i+1)/2}^{\min(N/2,i)} \frac{[k^{N/2}(2k)!]}{[(N/2-k)! \times k! (k-1)! (i-k)! (2k-i)!]}$$

$(22)$

式中: $p_{\text{D}}$  为无因次井底压力; $\bar{p}_{\text{wD}}$  为拉普拉斯空间下的无因次井底压力; $t_{\text{D}}$  为无因次时间; $z$  为拉普拉斯变量。

2 试井特征曲线图版分析

以 2 层 2 区模型为例,通过对模型的求解,可以得到无因次井底压力与无因次时间的关系。对于 2 层 2 区复合无限大边界油藏,其试井图版曲线如图 2 所示。计算参数为: $S_1 = S_2 = 0, C_{1,\text{D}} = C_{2,\text{D}} = 800, K_1 h_1 / K_2 h_2 = 1, r_{1,\text{CD}} = 500, r_{2,\text{CD}} = 2\,000, M_1 = M_2 = 5, \omega_1 = \omega_2 = 1$ 。

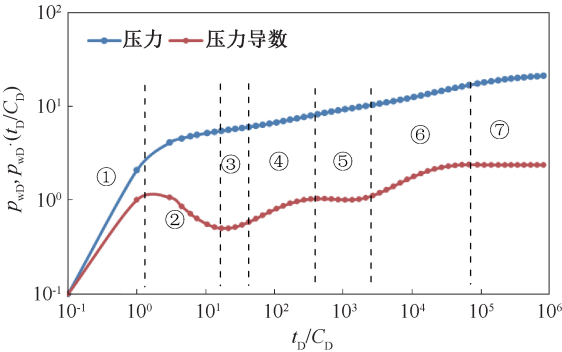


图 2 无层间窜流 2 层 2 区复合油层压力恢复双对数典型曲线

Fig.2 Log-log curves of build-up pressure of two areas of composite reservoir without layers interflow and with two-layer commingled production

根据导数曲线特征可划分 7 个流动段:①井筒储集阶段;②表皮控制的过渡流阶段;③内区径向流阶段;④1 层的内区向外区传导的过渡流动阶段,由流度比和储能比确定;⑤1 层外区和 2 层内区耦合流动阶段;⑥2 层的内区向外区传导的过渡流动阶段;⑦整个多层系统的径向流阶段。

考虑多层组合条件下某个参数特征容易被其他参数掩盖,在此以复合参数为重点进行单因素敏感性分析,在多层条件下,其特征在时间上呈现叠加效应,表现为“台阶”型特征。从双对数曲线图版中可看出,当流度比大于 1,内区流度好于外区,当流度小于 1,外区流度好于内区,随着流度比的增大,压力导数曲线过度段明显上翘,系统径向流直线上移(图 3)。当储容比大于 1 时,即外区储集能力大于内区;当储容比小于 1 时,即内区小于外区储集能力。随着两区储集能力差异的增大,即压力导数曲线上翘或下凹的幅度增大,过渡阶段的变化幅度逐渐增加(图 4)。随着复合半径的增加,压力和压力导数曲线变化的时间越晚,外区径向流的时间推迟(图 5)。

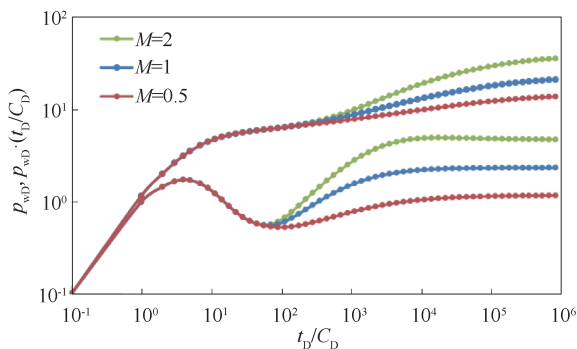


图 3 流度比差异对双对数曲线的影响

Fig.3 Effect of flow ratio difference on logarithmic curve

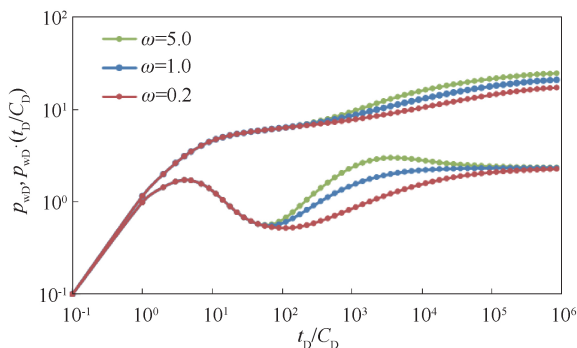


图 4 内外区储能比差异对双对数曲线的影响

Fig.4 Influence of the difference of energy storage ratio between inner and outer zones on the logarithmic curve

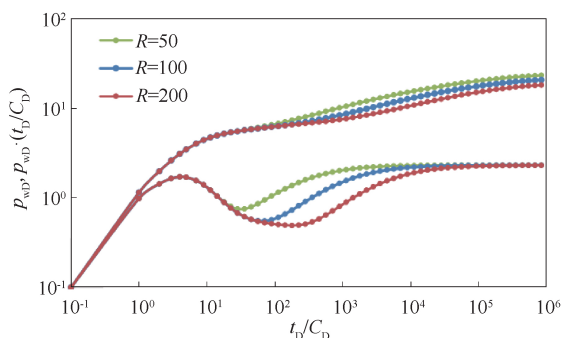


图 5 复合区半径差异对双对数曲线的影响

Fig.5 Effect of radius difference of composite zone on logarithmic curve

### 3 现场应用

渤海 M 油田为生屑云岩、砂岩和灰岩多套岩性复合储层, X 井位于一断块, 生产层位为沙河街组生屑云岩和潜山灰岩, 合采生产。该井 2009 年 12 月开井生产, 依靠天然能量自喷生产, 分别于 2010 年和 2012 年下入井下压力计进行关井压力恢复测试(图 6)。油井基础参数为:射孔层厚为 4.3 m, 井径 0.1 m, 地层孔隙度 12%, 原油体积系数 3.66, 黏度 0.1 mPa·s, 总压缩系数  $54.8 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ 。2010 年测试产量  $90 \text{ m}^3/\text{d}$ , 关井 138 h, 地层压降 3 MPa, 累计产油量  $0.64 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; 2012 年测试产量  $212 \text{ m}^3/\text{d}$ , 关井 240 h, 地层压降 4 MPa, 累计产油量  $10.26 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

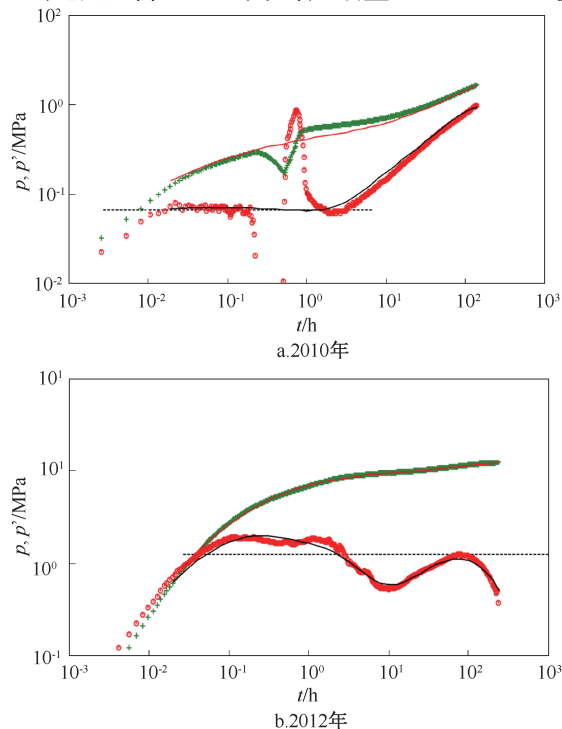


图 6 X 井两次关井压力及其导数双对数曲线

Fig.6 Double logarithmic curve of two shut-in pressure and its derivatives in Well X



根据产量和压力数据,利用物质平衡方法计算动态储量分别为  $30\times10^4\text{m}^3$  和  $240\times10^4\text{m}^3$ ,结合试井解释曲线形态分析认为(图 6),油井衰竭开采,随着压降程度增加,动用半径扩大,压力探测范围内动用储层发生变化。因此,根据 2 层 2 区复合试井解释模型对其进行试井解释分析(表 1)。

Table 1 Interpretation result table of the real case						
小层	模型	渗透率/ mD	表皮 系数	复合半 径/m	流度 比	储能比
I	复合	12.6	-3.14	82.6	1.1	0.0722
II	均质	0.8	0.24	-	-	-
						三面封闭+定压
						三面封闭

综合试井解释结果和地质认识,该井表现为双层特征,受“U”形边界控制,西北方向存在能量供给的复合地层;I 小层解释储能比为 0.072 2,表明该层外区的储能系数是内区的 13.84 倍,具有较高的孔隙体积或弹性能量,是该井长期高产稳产的物质基础。基于多层复合油藏分析结果,该井区于 2016 年进行了开发评价井 Y 井的钻探,实钻油层厚度为 20 m,监测地层压力 41 MPa,压降 5 MPa。Y 井地层压力与 X 井一致,且日产油  $50\text{m}^3$ ,表明井间连通且储量规模较大,证实了地质模式和油藏研究的结论的可靠性(图 7、图 8)。

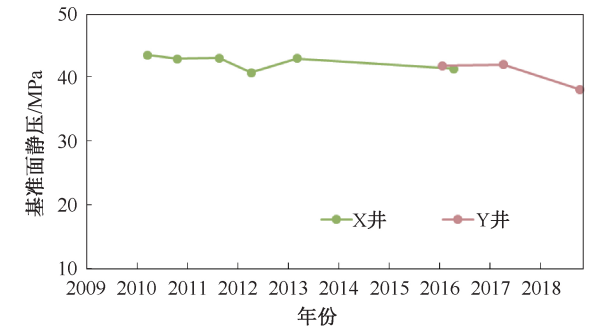


图 7 X 井、Y 井地层静压变化曲线  
Fig.7 Static pressure change curve in X well and Y well

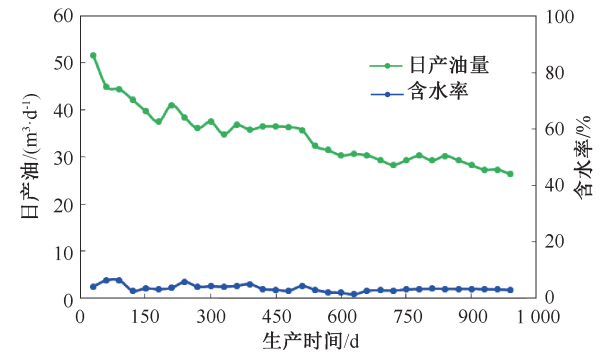


图 8 Y 井产油量和含水率变化曲线  
Fig.8 Oil production and water content change curve in well Y

4 结论

(1) 无层间窜流的多层复合渗流模型与单层均质渗流模型特征曲线明显不同,压力导数曲线存在反映复合物性变化的“台阶”型,同时每个层的复合变化不同会引起压力导数出现多个“台阶”。

(2) 无层间窜流双层复合渗流模型压力导数曲线有反映层间和内外区差异的“凹子”特征,“凹子”形态和出现时间受各层复合储层流度比、储容比和复合半径的叠加影响。

(3) 本文研究的试井分析模型适用于多层且平面存在复合特征的油藏试井解释,结合古地貌约束下的沉积研究成果可以有效的应用于中深层油藏精细描述,指导油田的开发调整。

致谢:感谢渤海石油研究院同意该论文公开发表;感谢各位领导的大力支持。

参考文献

[1] LEFKOVITS H C, HAZEBROEK P, ALLEN E E, et al. A study of the behavior of bounded reservoirs composed of stratified layers [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1961,1(1):43-58.

[2] LOUCKS T L, GUERRERO E T. Pressure drop in a composite reservoir [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1961,1(3):170-176.

[3] LOLON E P, ARCHER R A, BLASINGAME T A. New semi-analytical solutions for multilayer reservoirs [C]. SPE 114946, 2008.

[4] KUCHUK F J, HABASHY T. Pressure behavior of laterally composite reservoirs [J]. SPE Formation Evaluation, 1997,12(1):47-56.

[5] HUANG R J, LI S C, PU J, et al. A new method for solving the model of the seepage in multilayered reservoir [J]. Image Processing for Cinema, 2014, 4(3): 305.

[6] ZHANG L H, GUO J J, LIU Q G. A new well test model for a two-zone linear composite reservoir with varied thicknesses [J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(6): 804-809.

[7] 齐与峰,史久浩,孙长明. 多层压力恢复曲线理论研究及其在矿场中的应用[J]. 大庆石油地质与开发,1983, 2(1):33-44.

QI Yufeng, SHI Jiuhao, SUN Changming. Theoretical study on build-up curves from multilayers and its application to the field [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1983,2(1):33-44.

[8] 刘义坤,阎宝珍,翟云芳,等. 均质复合油藏试井分析方法[J]. 石油学报,1994,15(1):92-100.

LIU Yikun, YAN Baozhen, ZHAI Yunfang, et al. Transient pressure behavior in a homogeneous composite reservoir [J].

- Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(1): 92-100.
- [9] 曾萍, 张望明. 复合油藏试井的半对数分析法[J]. 江汉石油学院学报, 1995, 17(4): 49-52.  
ZENG Ping, ZHANG Wangming. Semilogarithmic analysis applicable to pressure transient testing for wells producing from a composite reservoir [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1995, 17(4): 49-52.
- [10] 王晓冬, 刘慈群. 分层合采油井产能分析[J]. 石油钻采工艺, 1999, 21(2): 56-61.  
WANG Xiaodong, LIU Ciqun. Productivity analysis on commingled production wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1999, 21(2): 56-61.
- [11] 张望明, 韩大匡, 连洪祥, 等. 多层油藏试井分析[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(3): 63-66.  
ZHANG Wangming, HAN Dakuang, LIAN Qixiang, et al. Well test analysis in multi-layer reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(3): 63-66.
- [12] 廖新维. 考虑交接面附加阻力的复合油藏试井模型[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(5): 30-31.  
LIAO Xinwei. Well test model of compound reservoir considering on additional resistance force on conjoining plate [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(5): 30-31.
- [13] 刘军, 何顺利, 门成全, 等. 多层气藏地层压力理论求解方法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(30): 9025-9028.  
LIU Jun, HE Shunli, MEN Chengquan, et al. A theoretical method for formation pressure in commingled gas reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(30): 9025-9028.
- [14] 李顺初, 刘平礼, 赵立强. 复合油藏中不同边界条件下的井底压力分析[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(5): 32-33.  
LI Shunchu, LIU Pingli, ZHAO Liqiang. The analysis of bottom pressure in complex reservoir with different boundary conditions [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(5): 32-33.
- [15] 李顺初, 张普斋, 黄炳光. 多层油藏压力分布的一般解[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(4): 28-29.  
LI Shunchu, ZHANG Puzhai, HUANG Bingguang. General solution of the pressure distribution in multilayer reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(4): 28-29.
- [16] 霍进, 贾永禄, 王海涛, 等. 多层窜流油气藏模型及井底压力动态[J]. 油气井测试, 2006, 15(2): 1-4.  
HUO Jin, JIA Yonglu, WANG Haitao, et al. Oil and gas reservoir model for multiplayer channeling and dynamic monitor down hole pressure [J]. Well Testing, 2006, 15(2): 1-4.
- [17] 杨秀祥, 程时清, 袁玉金, 等. 特低渗透油藏试井解释中的模型选择及油藏诠释[J]. 油气井测试, 2007, 16(2): 14-16.  
YANG Xiuxiang, CHENG Shiqing, YUAN Yujin, et al. Well testing model selection and reservoir annotation to low permeability reservoirs [J]. Well Testing, 2007, 16(2): 14-16.
- [18] 高杰, 冯青, 黄子俊, 等. 海上油田压裂充填井三区复合渗流模型及敏感性分析[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 8-13.  
GAO Jie, FENG Qing, HUANG Zijun, et al. Three-zone composite seepage model for fracpack wells in offshore oil-fields and its sensitivity analysis [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 8-13.
- [19] 陈仲良, 王怒涛, 呈皇辉, 等. 有关多层合采和斜井的试井解释[J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 29-32.  
CHEN Zhongliang, WANG Nutao, CHENG Huanghui, et al. Well test interpretation about multilayer commingled and inclined well [J]. Well Testing, 2017, 26, 26(3): 29-32.
- [20] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 251-258.

编辑 王 军

**第一作者简介:** 吴浩君, 男, 1986 年出生, 工程师, 2012 年毕业于中国石油大学(北京)石油与天然气工程专业, 现从事海上油气田开发油藏工程和数值模拟等方面研究。电话: 022-66500863, 18630934410; Email: wuhj8@cnooc.com.cn。通信地址: 天津市滨海新区海川路 2121 号渤海石油管理局 B 座 1409, 邮政编码: 300450。