

# 双层油藏垂直井套管外窜流试井解释模型

苏泽中<sup>1</sup>, 李晓娜<sup>1</sup>, 李蒙蒙<sup>2</sup>, 刘瑞<sup>1</sup>, 林加恩<sup>1</sup>

(1. 西安石油大学西部低渗—特低渗油藏开发与治理教育部工程研究中心, 陕西 西安 710065;

2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 昌平 102249)

**摘要:**为了监测和预防套管外窜流,建立了考虑层间半透率和井筒储集效应的双层油藏垂直井套管外窜流试井解释模型。采用拉普拉斯变换进行求解并绘制典型试井曲线,划分出四个流动段:纯井储段、过渡段、窜流段和系统径向流段。通过对试井曲线综合分析得出以下结论:①试井曲线受多因素综合影响;井储系数影响纯井储段,表皮因子、渗透率、流体粘度、油层厚度,窜流系数等影响过渡段和窜流段;②测试层和邻近层相关参数对试井曲线的影响呈相反趋势;③套管外窜流强度的主控因素为:窜流系数、邻近层地层渗透率和测试层表皮因子;④造成套管外窜流的原因是套管外水泥环的破损程度,并提出了相应的检测方法。

**关键词:** 双层油藏; 垂直井; 套管外窜流; 试井解释模型

中图分类号: TE353

文献标识码: A

## Well test interpretation model about interporosity flow outside casing around vertical well in dual layer reservoir

Su Zezhong<sup>1</sup>, Li Xiaona<sup>1</sup>, Li Mengmeng<sup>2</sup> and Liu Rui<sup>1</sup> and Lin Jiaen<sup>1</sup>

(1. MOE Engineering Research Center of Development & Management of Western Low & Ultra-low Permeability Oilfield, Xi'an Shiyu University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. College of Petroleum Engineering of China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing 102249, China)

**Abstract:** In order to monitor and prevent the channeling outside the casing, we established a well-testing interpretive mathematical model of the vertical wells in dual layer reservoir considering the semi-permeability of the interlaminar and the bore hole storage effect. Then we solved and drew the typical well test curves by the Laplace transformation. According to the test curves, there are four flow sections: intermediate flow period, transition section, interporosity flow section and systematic radial flow period. By the analysis of the influence factors of the type curve, we conclude that: ① Well testing curves are influenced by many parameters, for example, the well storage coefficient affects the early curves, while the skin factors, permeability, fluid viscosity, oil layer thickness, and cross flow coefficient affect its transition stage and interporosity flow stage. ② The parameters of the test layer and neighbor layer have an opposite effect on the well test curves. ③ The main controlling factors of the strength of the interporosity flow outside the casing include the interporosity flow coefficient, the permeability of neighbor layer and the skin factors of test layer. ④ The reason of the interporosity flow outside the casing is the damage degree of the cement sheath outside the casing, and the corresponding monitoring method is put forward.

**Key words:** dual layer reservoir, vertical well, cross flow behind casing, well-testing interpretive model

层状油藏中,由于固井质量差、射孔、开采过程中管理措施不当、套管腐蚀等<sup>[1]</sup>原因会造成套管外窜流。套管外窜流会导致地层堵塞、腐蚀、油井产能降

低、地层压力系统被破坏,特别是在近海大陆架油田,套管外窜流造成的持续性环空压力问题严重影响海上油田的正常生产。此外,原油中含有的多环

收稿日期: 2017-07-21。

第一作者简介: 苏泽中(1990—),男,硕士,油气藏监测与管理。

基金项目: 陕西省国际科技合作与交流计划项目“陕西省油气资源开发地下水环保技术和立法研究”(2015KW-029);西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目“利用动态资料研究缝洞型油藏井间连通性—以塔河油田某区块为例”(YCS16211005)。

芳烃、重金属、放射性核素等有害物质,因为套管外窜流进入地下水层会造成严重的水污染。

试井技术可以判断套管外是否发生窜流。高承泰<sup>[2]</sup>建立了考虑分层储容和表皮因子、井筒储集效应等多种因素的三层油藏串漏垂向干扰试井解释模型。Kremenetskiy M I<sup>[3]</sup>等采用数值模拟结合试井理论的方法判断套管外窜流。Aadnoy Bernt S<sup>[4]</sup>等从漏失的角度研究了试井和地应力解释模型。Gasbarr S<sup>[5]</sup>等利用脉冲试井结合数值模拟研究层状地层的水窜、井筒完整性、水锥、油水界面推进等问题。Gandomkar A<sup>[6]</sup>等建立了基于线弹性同心圆筒理论的漏失测试模型,该模型考虑了井筒周围和近井地带的岩石力学性质。Anisur Rahman<sup>[7]</sup>等建立了具有套管外窜流的层状油藏试井解释模型。

该文建立了考虑层间半透率和井筒储集效应的双层油藏垂直井套管外窜流试井解释模型。采用拉普拉斯变换、Stehfest 数值反演求解模型解析解,绘制出典型图版曲线,分析了套管外窜流的影响因素,为套管外窜流监测提供新的方法。

## 1 物理模型

模型假设如下:1) 由两个无限大地层组成,分别为测试层和邻近层,两层之间存在半透壁;2) 测试层和邻近层均为均质储层,储油性和渗透性不同;3) 目标井为采油井定产量生产,开始生产前系统处于平衡状态;4) 两层均给井底供液,同时由邻近层向测试层发生套管外窜流;5) 考虑井筒储集和表皮

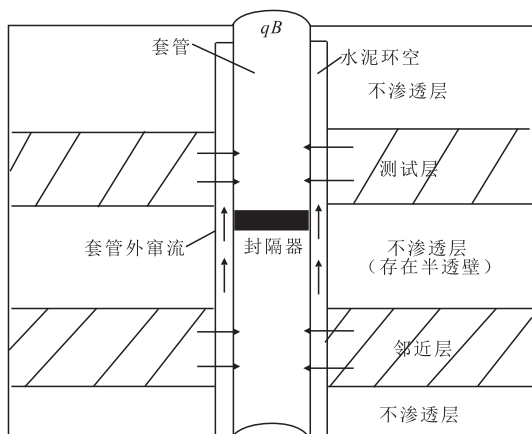


图1 双层油藏垂直井套管外窜流模型示意图

Fig. 1 Model of cross flow behind casing in vertical wells of dual layer reservoir

效应的影响;6) 不考虑重力的影响;7) 忽略流体通过套管外渗流通道时压缩性的影响(图1)。

## 2 数学模型

两个无限大均质储层, $j=1$ 表示测试层, $j=2$ 表示邻近层, $\tilde{K}$ 为上下两层的半透率,开始生产前地层处于水动力学平衡状态。

(1) 扩散方程

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_1}{\partial r} = \frac{1}{\eta_1} \frac{\partial p_1}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 p_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_2}{\partial r} = \frac{1}{\eta_2 \tilde{K}} \frac{\partial p_2}{\partial t} \quad (2)$$

$$\eta_j = \frac{0.003 6 k_j}{\phi_j \mu c_{ij}} \quad j=1, 2 \quad (3)$$

(2) 初始条件

$$p_j(r, 0) = p_0 \quad j=1, 2 \quad (4)$$

(3) 内边界条件

$$qB + 24C \frac{dp_{wf}}{dt} = \sum_{j=1}^2 q_j(t)B \quad j=1, 2 \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial p_j}{\partial r} \right|_{r_{wj}} = \frac{1.842 q_j(t) B \mu}{k_j h_j r_{wj}} = \frac{q_j(t) B}{\alpha_j} \quad j=1, 2 \quad (6)$$

$$\alpha_j = \frac{k_j h_j r_{wj}}{1.842 \mu} \quad j=1, 2 \quad (7)$$

$$p_{wf} = p_1 \Big|_{r_{we1}} \quad (8)$$

(4) 外边界条件

$$p_j(r \rightarrow \infty, t) = p_0 \quad j=1, 2 \quad (9)$$

(5) 连接面条件

$$\frac{f_c}{282.4 \pi \mu} (p_2 \Big|_{r_{w2}} - p_1 \Big|_{r_{w1}}) = q_2(t)B \quad (10)$$

(6) 有效井筒半径

$$r_{wej} = r_{wj} \exp(S_j) \quad (11)$$

式中: $B$ 为原油体积系数,无因次; $c_{ij}$ 为第 $j$ 层总系统压缩系数, $\text{MPa}^{-1}$ ; $C$ 为井筒储集系数, $\text{m}^3/\text{MPa}$ ; $f_c$ 为窜流系数; $j$ 为层标, $j=1$ 测试层、 $j=2$ 邻近层; $k_j$ 为第 $j$ 层的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; $h_j$ 为第 $j$ 层的油层厚度, $\text{m}$ ; $p_0$ 为原始地层压力, $\text{MPa}$ ; $p_{j(t,v)}$ 为第 $j$ 层在 $t$ 时间的地层压力, $\text{MPa}$ ; $p_{wf}$ 为井底流压, $\text{MPa}$ ; $q_1$ 为测试层产量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $q_2$ 为邻近层产量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $r$ 为径向距离, $\text{m}$ ; $r_{wj}$ 为第 $j$ 层井筒半径, $\text{m}$ ; $r_{wej}$ 为第 $j$ 层等效井筒半径, $\text{m}$ ; $S_j$ 为第 $j$ 层

表皮系数;  $t$  为生产时间,  $h$ ;  $\Phi_j$  为第  $j$  层孔隙度;  $\eta_j$  为第  $j$  层导压系数,  $\text{m}^2/\text{h}$ ;  $\mu$  为流体黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

### 3 模型求解

定义下列无量纲量: 无量纲压力  $p_{\text{D}} = \frac{(kh)_i(p_i - p)}{1.842 \times 10^{-3} qB\mu}$ ,  $j=1, 2$ ; 无量纲井筒储集系数  $C_{\text{D}} = \frac{C}{2\pi(\varphi C_i h)_i r_w^2}$ ; 无量纲时间  $t_{\text{D}} = \frac{3.6(kh)_i t}{(\varphi h c_i)_i r_w^2}$ ,  $j=1, 2$ ; 无量纲渗透率  $K_{\text{D}} = \frac{\bar{K}_r^2}{(kh)_i}$ ;  $W_j = \frac{(kh)_j}{(kh)_i}$ ,  $j=1, 2$ 。对无量纲化的数学模型进行拉普拉斯变换求解, 利用 Stchfest 数值反演至时间域得到模型的解析解。

方程的解分别为:

$$\bar{p}_{1\text{D}}(r_{\text{D}}, z) = AI_0(\sqrt{z/\eta_1 r_{\text{D}}}) + BK_0(\sqrt{z/\eta_1 r_{\text{D}}}) \quad (12)$$

$$\bar{p}_{2\text{D}}(r_{\text{D}}, z) = CI_0(\sqrt{z/\eta_2 K_{\text{D}} r_{\text{D}}}) + DK_0(\sqrt{z/\eta_2 K_{\text{D}} r_{\text{D}}}) \quad (13)$$

由外边界条件得出  $C=0, A=0$ , 因此:

$$\bar{p}_{2\text{D}}(r_{\text{D}}, z) = DK_0(\sqrt{z/\eta_2 K_{\text{D}} r_{\text{D}}}) \quad (14)$$

$$\bar{p}_{1\text{D}}(r_{\text{D}}, z) = BK_0(\sqrt{z/\eta_1 r_{\text{D}}}) \quad (15)$$

由(14)和(15)以及内边界条件和交界面条件可得:

$$P_{\text{WD1}} = \frac{\{L_4[K(\lambda_1) + S_1] - L_3 a_1 [K(\lambda_2) + S_1]\}}{z(L_1 L_4 - L_2 L_3)} \quad (16)$$

$$P_{\text{WD2}} = \frac{\{L_4 a_2 [K(\lambda_1) + S_2] - L_3 [K(\lambda_2) + S_2]\}}{z(L_1 L_4 - L_2 L_3)} \quad (17)$$

其中:

$$L_1 = W_1 + a_2 W_2 + C_{\text{D}} z [K(\lambda_1) + S_1]$$

$$L_2 = a_1 W_1 + W_2 + a_1 C_{\text{D}} z [K(\lambda_2) + S_1]$$

$$L_3 = a_{\text{D}} \{K(\lambda_1) + S_1 - a_2 [K(\lambda_2) + S_2]\} - a_2 W_2$$

$$L_4 = \alpha_{\text{D}} \{a_1 [K(\lambda_2) + S_1] - [K(\lambda_2) + S_2]\} - W_2$$

$$\alpha_{\text{D}} = \frac{(2-M)K_{\text{D}} + \eta_1 z - \lambda_2^2 W_1}{(2-M)K_{\text{D}} + \eta_2 z - \lambda_1^2 W_2}$$

$$M = \frac{4K_{\text{D}}}{4K_{\text{D}} + zFc}$$

$$\lambda_{1,2} = \sqrt{\frac{E_1}{2} \pm \sqrt{\frac{E_1^2}{4} - E_2}}$$

$$E_1 = \frac{(2-M)K_{\text{D}}}{W_1 W_2} + z \left( \frac{\eta_1}{W_1} + \frac{\eta_2}{W_2} \right)$$

$$E_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{W_1 W_2} z^2 + \frac{(2-M)K_{\text{D}}}{W_1 W_2} z + \frac{4(1-M)K_{\text{D}}^2}{W_1 W_2}$$

其中函数  $K(x)$  定义为:

$$K(x) = \frac{K_0(x)}{xK_1(x)} \approx \ln \frac{2}{\gamma x} \quad \text{当 } x < 0.01$$

$K_0, K_1$  是变形贝塞尔函数,  $\gamma = 1.78107$  是欧拉常数。

## 4 试井曲线综合分析

### 4.1 典型曲线

根据方程求得的无量纲压力和无量纲压力导数值, 绘制了压力和压力导数双对数典型曲线图版。模型参数如下: 无量纲井筒储集系数  $C_{\text{D}} = 10 \text{ MPa}/\text{m}^3$ 、测试层表皮系数  $S_1 = 0.5$ 、邻近层表皮系数  $S_2 = 0.5$ 、测试层渗透率  $k_1 = 30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、邻近层渗透率  $k_2 = 20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、测试层流体黏度  $\mu_1 = 0.2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、邻近层流体黏度  $\mu_2 = 0.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、测试层油层厚度  $h_1 = 15 \text{ m}$ 、邻近层油层厚度  $h_2 = 8 \text{ m}$ 、窜流系数  $f_c = 20$ 。

图2是双层油藏垂直井套管外窜流试井解释模型的典型双对数曲线。根据曲线特征划分为四个流动段: 早期纯井储段、过渡段、窜流段、系统径向流阶段。第一阶段为纯井筒储集效应阶段, 压力曲线和压力导数曲线重合, 双对数曲线呈现反映井筒储集效应的斜率为1的直线; 第二阶段是从井储段向套管外窜流段过渡, 测试层和邻近层互不干涉向井底供油, 压力导数曲线出现峰值后下降, 此阶段波峰最高值受多个参数影响; 第三阶段生产一段时间后, 由于测试层与邻近层出现压差发生套管外窜流, 最明显的特征是出现压力导数曲线出现向下的“凹子”; 第四阶段系统达到动态平衡状态, 压力导数曲线呈现为水平直线段斜率为0.5。

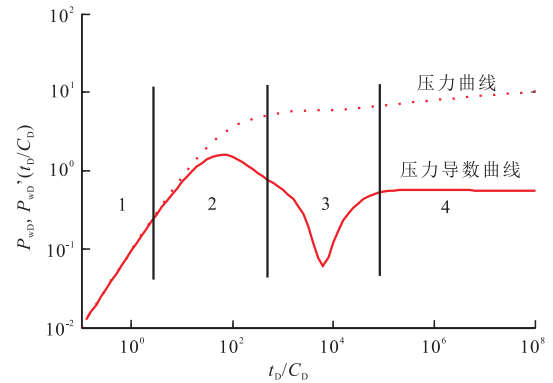


图2 试井解释模型理论曲线  
Fig. 2 Theoretical curves of well test interpretation model

### 4.2 敏感性分析

采用控制变量法对典型试井曲线的敏感性进行分析。分别研究了窜流系数(单位长度内流体通过套管外水泥环的渗透能力大小<sup>[7]</sup>)、表皮因子、渗透率、黏度、油层厚度对试井曲线的影响。

#### 4.2.1 窜流系数对试井曲线的影响

如图3所示,窜流系数 $f_c$ 增大,压导曲线窜流段“凹子”深度增大。分析认为,管外窜流发生在套管外水泥环内部,窜流系数越大,水泥环渗透能力越强,水泥环受损越严重,反映在双对数曲线上为窜流段“凹子”深度增加。

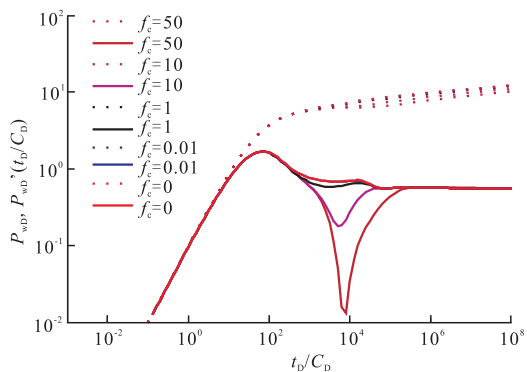
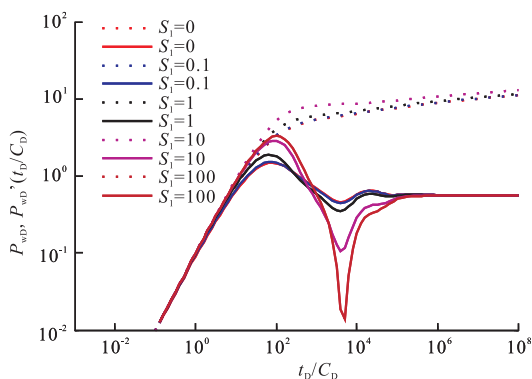


图3 窜流系数对试井曲线的影响

Fig. 3 Influence of interporosity flow coefficient on testing curves

#### 4.2.2 表皮因子对试井曲线的影响

如图4所示,表皮因子 $S_1$ 增大时,过渡段“驼峰”高度增加,窜流段“凹子”深度增大。表皮因子 $S_2$ 增大时,曲线整体上移,压导曲线窜流段“凹子”深度减小



注:下标1表示测试层,下标2表示邻近层

小。表皮系数越大,近井地带污染越严重,井筒周围地层渗透率下降越厉害,流体由地层进入井筒的流动阻力越大。分析认为, $S_1$ 增大,层间压差增加,管外窜流强度增大,窜流段“凹子”深度增加; $S_2$ 增大,层间压差减小,管外窜流强度减小,窜流段“凹子”深度减小。

#### 4.2.3 渗透率对试井曲线的影响

如图5所示,渗透率 $K_1$ 增大时,曲线整体上移,压导曲线窜流段“凹子”深度减小,直至窜流段被掩盖,曲线直接过渡到系统径向流段。渗透率 $K_2$ 增大时,曲线整体下移,压导曲线窜流段“凹子”深度增大,压导曲线窜流段明显,曲线从三个流动段变成四个流动段。根据达西渗流理论,渗透率越大,地层向井筒供液能力越强。分析认为, $K_1$ 增大,测试层向井筒供液量增加,层间压差减小,管外窜流强度减小,窜流段“凹子”深度降低; $K_2$ 增大,邻近层向井筒供液量增加,层间压差增大,管外窜流强度增大,窜流段“凹子”深度增加。

#### 4.2.4 黏度对试井曲线的影响

如图6所示,黏度 $\mu_1$ 增大时,曲线整体下移,压导曲线窜流段“凹子”深度增大。黏度 $\mu_2$ 增大时,曲线整体上移,压导曲线窜流段“凹子”深度减小,过渡段“驼峰”降低,窜流段被掩盖,曲线直接过渡到系统径向流段。流体黏度越大,地层向井筒供液能力越弱。分析认为, $\mu_1$ 增大,测试层向井筒供液量降低,层间压差增大,管外窜流强度增大,窜流段“凹子”深度增加; $\mu_2$ 增大,邻近层向井筒供液量降低,层间压差降低,管外窜流强度减小,窜流段“凹子”深度降低。

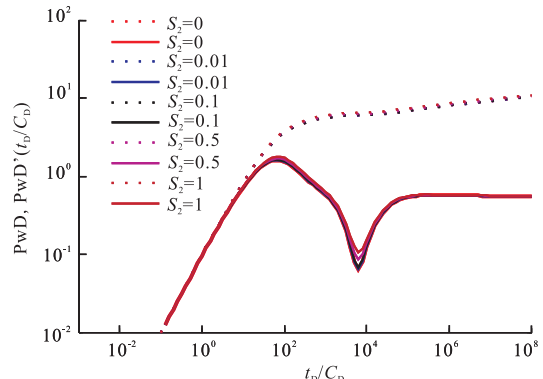
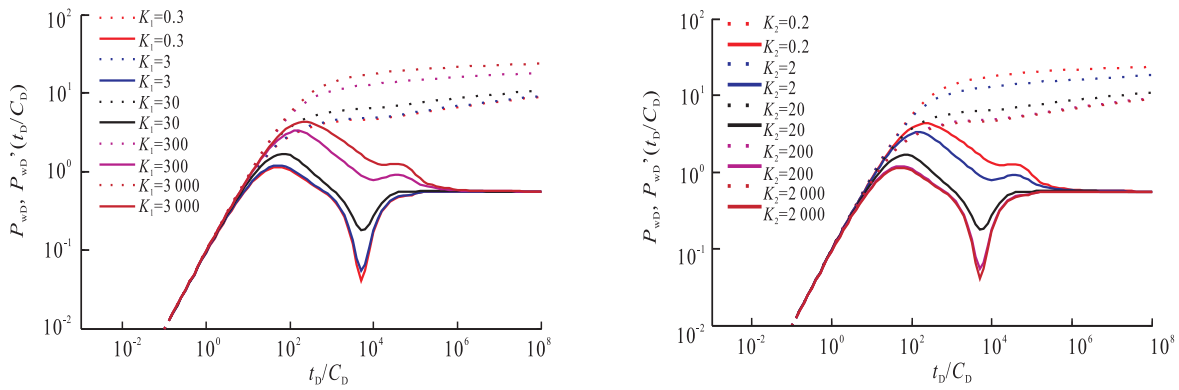


图4 表皮因子对试井曲线的影响

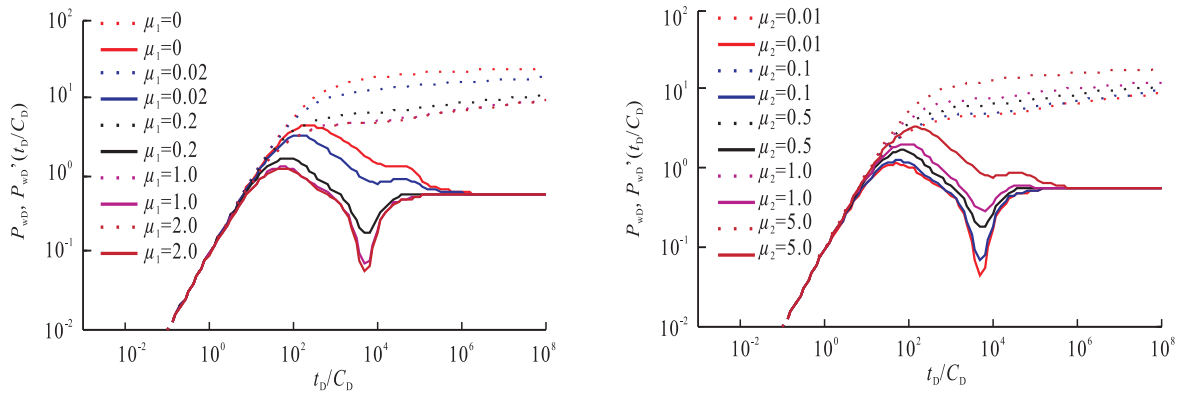
Fig. 4 Influence of skin factors on testing curves



注:下标1表示测试层,下标2表示邻近层

图5 渗透率对试井曲线的影响

Fig. 5 Influence of permeability on testing curves



注:下标1表示测试层,下标2表示邻近层

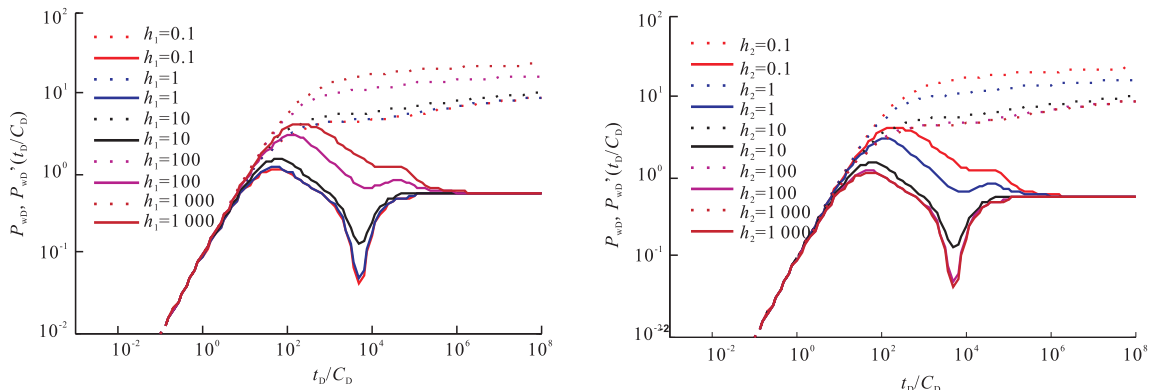
图6 黏度对试井曲线的影响

Fig. 6 Influence of viscosity on well test curve

4.2.5 储层厚度对试井曲线的影响

如图7所示,当储层厚度  $h_1$  增大时,曲线整体上升,压导曲线窜流段“凹子”深度减小,直至窜流段被掩盖,曲线直接过渡到系统径向流段。当储层厚度  $h_2$  增大时,压导曲线过渡段“驼峰”高度降低,窜

流段“凹子”深度增大,压导曲线窜流段明显。油层厚度同样对套管外窜流产生影响。理论上认为,生产井有效半径以及水泥环破损程度确定时,储层厚度越大射孔段越长,井筒供液能力越强。在井底压差的作用下,套管外窜流强度越大则窜流段“凹子”越深。



注:下标1表示测试层,下标2表示邻近层

图7 厚度对试井曲线的影响

Fig. 7 Influence of reservoir thickness on well test curve

4.3 AHP 法分析影响套管外窜流的主控因素

层次分析法(AHP法)是将复杂问题分解化,定性与定量相结合的综合性评价方法,能够通过计算影响因素的权重,确定影响因素的主次关系。基于试井曲线敏感性分析结果,针对窜流段影响因素:表皮因子、渗透率、流体黏度、油层厚度,窜流系数,采用AHP法分析了影响套管外窜流的主控因素。套管外窜流影响因素结构模型如图8所示。

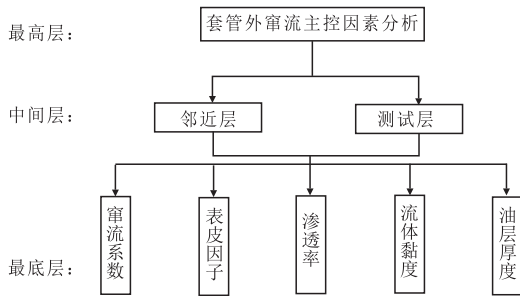


图8 套管外窜流影响因素结构模型

Fig. 8 Structure model of influencing factors of crossflow behind casing

表2给出了邻近层和测试层对套管外窜流的影响判断矩阵及权重  $W$ , 其中  $B_1$  表示邻近层,  $B_2$  表示测试层,  $W_{B_1}=0.5575$ 、 $W_{B_2}=0.4425$ 。结果表明,对于影响套管外窜流的强度来说,邻近层的影响大于测试层影响,这与假设条件从邻近层向测试层发生套管外窜流的结论是一致的。表3给出了邻近层的影响因素判断矩阵及权重  $W_{f_c}^1=0.3718$ 、 $W_{S_1}=0.1255$ 、 $W_{k_1}=0.2710$ 、 $W_{\mu_1}=0.1014$ 、 $W_{h_1}=0.1303$ 。结果表明,邻近层中对套管外窜流影响最大的是窜流系数,其次邻近层的渗透率。表4给出了测试层的影响因素判断矩阵及权重  $W_{f_c}^2=0.2681$ 、 $W_{S_2}=0.3123$ 、 $W_{k_2}=0.1023$ 、 $W_{\mu_2}=0.2277$ 、 $W_{h_2}=0.0896$ 。结果表明,测试层中对套管外窜流影响最大的是测试层表皮因子,其次是窜流系数。分析认为,对套管外窜流强度影响的主控因素分别为:窜流系数、邻近层地层渗透率和测试层表皮因子。

表2 中间层元素判断矩阵及权重

Table 2 Judgment matrix and weight of middle layer elements

A	$B_1$	$B_2$	$W$
$B_1$	1	2	0.5575
$B_2$	1/2	1	0.4425

表3 邻近层影响因素判断矩阵及权重

Table 3 Judgment matrix and weight of influence factors in neighbor layer

$B_1$	$f_c$	$S_1$	$k_1$	$\mu_1$	$h_1$	$W$
$f_c$	1	5	2	3	3	0.3718
$S_1$	1/5	1	1/3	1	2	0.1255
$k_1$	1/2	3	1	3	3	0.2710
$\mu_1$	1/3	1	1/3	1	1/3	0.1014
$h_1$	1/3	1/2	1/3	3	1	0.1303

表4 测试层影响因素判断矩阵及权重

Table 4 Judgment matrix and weight of influence factors in test layer

$B_2$	$f_c$	$S_2$	$k_2$	$\mu_2$	$h_2$	$W$
$f_c$	1	1/2	3	2	4	0.2681
$S_2$	2	1	3	1	5	0.3123
$k_2$	1/3	1/3	1	1/3	1	0.1023
$\mu_2$	1/2	1	3	1	3	0.2277
$h_2$	1/4	1/5	1	1/3	1	0.0896

4.4 套管外窜流监测方法

套管外水泥环的破损程度是导致套管外窜流发生的最主要原因,因此为了预防套管外窜流的发生,需要在油井投产前对水泥环进行声波变密度水泥胶结测井<sup>[8]</sup>确保水泥环胶结质量;在油井生产过程中,可定期采用“声波变密度水泥胶结测井+试井测试”对水泥环破损情况进行监测,监测周期为每年一次;当发生套管外窜流时,立即注水泥进行封堵,并采用“声波变密度水泥胶结测井+试井测试”对注水泥质量进行测试,保证套管外水泥环的完好程度。

5 结论

1) 建立了考虑井筒储存效应和表皮因子的双重渗透介质油藏的套管外窜流试井数学模型,通过拉普拉斯变换、Stchfest 数值反演求解模型解析解,利用MATLAB绘制典型曲线模板。典型曲线呈现出四个流动段:纯井储段、过渡段、窜流段和系统径向流段,整体上压力导数曲线表现出先上升后下降的特征。

2) 试井曲线影响因素分析得出以下结论:①窜流系数越大,套管外水泥环渗透性越强,套管外窜流越强;②测试层的表皮因子  $S_1$  越大,渗透率  $K_1$  越小,

黏度 $\mu_i$ 越大,储层厚度 $h_i$ 越小,套管外窜流越强;③邻近层测试层的表皮因子 $S_i$ 越小、渗透率 $K_i$ 越大、黏度 $\mu_i$ 越小、储层厚度 $h_i$ 越大,套管外窜流越强。

3) 采用AHP法确定了影响套管外窜流强度的主控因素为窜流系数,邻近层地层渗透率和测试层表皮因子。造成套管外窜流的原因是套管外水泥环的破损程度,提出了避免套管外窜流发生的方法:投产前采用声波变密度水泥胶结测井监测水泥环质量,生产过程中采用“声波变密度水泥胶结测井+试井测试”定期检测,窜流发生后注水泥封堵,采用“声波变密度水泥胶结测井+试井测试”对注水泥质量进行测试。

#### 参考文献

- [1] 吴奇. 井下作业监督(第二版)[M]. 北京:石油工业出版社, 2003.
- [2] 高成泰. 串漏垂向干扰试井的特征及解释方法[J]. 石油学报, 1994, 15(2):65-75.
- [3] Kremenetskiy M I, Ipatov A I, Kokurina V. Well-test interpretation in case of behind-the-casing crossflow[C]// paper SPE-115323-MS presented at the SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, 28-30 October 2008, Moscow, Russia.
- [4] Aadnoy Bernt S, Mostafavi Vahid, Hareland Geir. Fracture mechanics interpretation of leak-off tests[C]// paper SPE-126452-MS presented at the Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition, 14-16 December 2009, Kuwait City, Kuwait.
- [5] Gasbarri S, Basabe L, Fariña A, et al. Water-production diagnosis using transient test with multiphase flowmeter[C]// paper SPE-117236-MS presented at the SPE Eastern Regional/AAPG Eastern Section Joint Meeting, 11-15 October 2008, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- [6] Gandomkar A, Fu J, Gray K. E. Leak-off test model combining wellbore and near-wellbore mechanical behavior[C]// paper SPE-174876-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 28-30 September 2015, Houston, Texas, USA.
- [7] Anisur Rahman N M, Bin Akresh S A, Al-Thawad F M. Diagnosis and characterization of cross flow behind casing from transient-pressure tests[C]// paper SPE-174876-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 28-30 September 2015, Houston, Texas, USA.
- [8] 于兰. 声波变密度水泥胶结测井解释及固井质量评价方法[J]. 国外测井技术, 2008, 23(4):40-43.
- [9] 伍世英. 特高含水油田提高采收率方法筛选[D]. 长江大学, 2015.
- [10] 陈粟, 王敬瑶, 陈茜. 乾安油田剩余油分布规律及挖潜研究[J]. 油气藏评价与开发, 2011, 1(3):26-29.
- [11] 李振伟, 郑怀衣, 柳金宝, 等. 大港南部复杂断块油藏不同含水期开发调整方向分析研究[J]. 中国矿业, 2013, 22(2):68-74.
- [12] 王滨. 特高含水油藏开发效果评价体系研究[D]. 北京:中国石油大学, 2008.
- [13] 杨力争. 萨中开发区特高含水期开发规律的研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2011.
- [14] 李传亮, 油藏工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2011.
- [15] 秦同洛, 李盩, 陈元千. 实用油藏工程方法[M]. 北京:石油工业出版社, 1992.
- [16] 翟云芳, 渗流力学[M]. 北京:石油工业出版社, 1998.
- [17] 邴绍献, 基于特高含水期油水两相渗流的水驱开发特征研究[D]. 成都:西南石油大学, 2013.
- [18] 戴胜群, 付波, 洪秀娥, 等. 油藏综合相渗曲线拟合方法[J]. 油气藏评价与开发, 2011, 1(3):1-4.
- [19] 郭元岭, 鲁国明. 水淹层含水率与含水饱和度的区域性直线模型及应用[J]. 油气采收率技术, 1996, 3(2):45-49.
- [20] 张学磊, 李传亮, 樊茹. 采油速度对油水界面上升和底水锥进的影响[J]. 断块油气田, 2010, 17(5):583-585.
- [21] 唐资昌, 程林松, 李春兰. 偏相关分析在采油速度影响因素分析中的应用[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(4):423-425.
- [22] 王怒涛, 钟飞翔, 代万波, 等. 确定合理采油速度的最优化方法[J]. 断块油气田, 2005, 12(4):45-47.
- [23] 赵伦, 陈希, 陈礼, 等. 采油速度对不同黏度均质油藏水驱特征的影响[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3):352-357.
- [24] 杨智刚, 张震恺, 阿布都艾尼, 等. 水驱油田影响采油速度的因素[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(5):588-591.
- [25] 刘洪波, 荆克尧. 选择合理采油速度保持石油工业持续稳定发展[J]. 当代石油石化, 2001, 9(5):30-33.
- [26] 姜风光, 王小林. 采油速度影响因素及理论值研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(6):104-108.
- [27] 杨智刚, 王意, 张永利, 等. 特高含水油田采油速度对比研究——以库姆克尔油田为例[J]. 新疆石油天然气, 2016, 12(3):32-35.
- [28] 吴文有, 王禄春, 张继风, 等. 特高含水期油田采油速度主要影响因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2012, 31(5):51-55.

(编辑 杨友胜)

(上接第21页)

和度, 无因次;  $R$  为采出程度, 无因次;  $V_w$  为采油速度, 无因次;  $f_w$  为年含水上升速度, %;  $t$  为时间变量, a。

#### 参考文献

- [1] 张学磊, 李传亮, 樊茹. 采油速度对油水界面上升和底水锥进的影响[J]. 断块油气田, 2010, 17(5):583-585.
- [2] 唐资昌, 程林松, 李春兰. 偏相关分析在采油速度影响因素分析中的应用[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(4):423-425.
- [3] 王怒涛, 钟飞翔, 代万波, 等. 确定合理采油速度的最优化方法[J]. 断块油气田, 2005, 12(4):45-47.
- [4] 赵伦, 陈希, 陈礼, 等. 采油速度对不同黏度均质油藏水驱特征的影响[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3):352-357.
- [5] 杨智刚, 张震恺, 阿布都艾尼, 等. 水驱油田影响采油速度的因素[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(5):588-591.
- [6] 刘洪波, 荆克尧. 选择合理采油速度保持石油工业持续稳定发展[J]. 当代石油石化, 2001, 9(5):30-33.
- [7] 姜风光, 王小林. 采油速度影响因素及理论值研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(6):104-108.
- [8] 杨智刚, 王意, 张永利, 等. 特高含水油田采油速度对比研究——以库姆克尔油田为例[J]. 新疆石油天然气, 2016, 12(3):32-35.
- [9] 吴文有, 王禄春, 张继风, 等. 特高含水期油田采油速度主要影响因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2012, 31(5):51-55.
- [10] 伍世英. 特高含水油田提高采收率方法筛选[D]. 长江大学, 2015.
- [11] 陈粟, 王敬瑶, 陈茜. 乾安油田剩余油分布规律及挖潜研究[J]. 油气藏评价与开发, 2011, 1(3):26-29.
- [12] 李振伟, 郑怀衣, 柳金宝, 等. 大港南部复杂断块油藏不同含水期开发调整方向分析研究[J]. 中国矿业, 2013, 22(2):68-74.
- [13] 王滨. 特高含水油藏开发效果评价体系研究[D]. 北京:中国石油大学, 2008.
- [14] 杨力争. 萨中开发区特高含水期开发规律的研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2011.
- [15] 李传亮, 油藏工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2011.
- [16] 秦同洛, 李盩, 陈元千. 实用油藏工程方法[M]. 北京:石油工业出版社, 1992.
- [17] 翟云芳, 渗流力学[M]. 北京:石油工业出版社, 1998.
- [18] 邴绍献, 基于特高含水期油水两相渗流的水驱开发特征研究[D]. 成都:西南石油大学, 2013.
- [19] 戴胜群, 付波, 洪秀娥, 等. 油藏综合相渗曲线拟合方法[J]. 油气藏评价与开发, 2011, 1(3):1-4.
- [20] 郭元岭, 鲁国明. 水淹层含水率与含水饱和度的区域性直线模型及应用[J]. 油气采收率技术, 1996, 3(2):45-49.

(编辑 杨友胜)