断层板状油藏斜井试井模型研究

张 旭¹ 刘启国² 张小龙³ 徐剑明⁴

1.中国石油玉门油田分公司,甘肃 酒泉 735019

2.西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500

3.中海石油(中国)有限公司上海分公司研究院,上海 200030

4.中国石化中原油田普光分公司采气厂,四川 达州 635000

摘要:

Ozkan 等人利用点源法在拉氏空间中建立了顶底封闭无限大均质地层中斜井的渗流模型,并 用拉式数值反演计算出了斜井的井底压力响应。随着定向井技术日益成熟,采用斜井对断块油藏进 行开发越来越普遍,但目前缺乏相应的试井理论图版,给断层油藏的试井工作带来了困难。利用杜 哈美叠加原理、镜像反映原理和 Stehfest 反演算法,建立并求解了顶底封闭板状断层油藏斜井试井 模型,考虑了井储和表皮对斜井无因次压力和压力导数曲线的影响,分析讨论了该类油藏斜井渗流 特征及影响因素,为断层油藏中的斜井试井解释提供一定的理论基础。

关键词:

断层;斜井;试井模型;压力动态

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2012)05-0060-03

0 前言

Cinco^[1]于 1975 年首次提出了斜井的稳定压力动态研究,假设无限大板状油藏顶底封闭,不考虑井筒储集和表皮的影响,用点源解和格林函数法得到无限大空间的线源解,再用镜像反映法导出板状油藏斜井的压力动态解析解。1990年,Abbaszadeh等人^[2]用点源解和格林函数法推导了无限大板状油藏在具有气顶、底水或混合情况下,一口无限导流斜井压力响应的理论解,Abbaszadeh等人在 Cinco 研究基础上导出了封闭边界模型和混合边界与定压边界模型的解析解,并考虑了井筒储集和表皮的影响。廖新维等人^[3]、Ozkan等人^[4]在斜井试井模型方面均有相关研究,而关于断

层板状油藏中的斜井试井研究甚少。本研究在顶底封闭板状油藏数学物理模型的基础上,通过引入断层和斜井,建立了顶底封闭板状断层板状油藏斜井试井模型,进行了计算和求解,绘制了理论图版并分析了影响因素。

1 模型的建立与求解

顶底封闭板状断层油藏斜井试井模型基本假设 条件:地层均质等厚,各向同性;流体为单相弱可压缩 流体,地层压力变化对流体物性不产生影响;地层流 体流动服从线性达西渗流规律;考虑井筒储集效应和 表皮效应影响;油井以恒定产量q开井生产。

收稿日期: 2012-05-28 **基金项目:** 国家科技重大专项(2008ZX05013) 作者简介: 张 旭(1983-),男,四川自贡人,硕士,主要从事油气田开发工程方面的工作。

第 30 卷 第 5 期 OIL AND GAS FIELD DEVELOPMENT 油气田开发 61

在 Ozkan 等人^[5]的研究思路基础上,通过点源解 建立顶底封闭板状断层油藏的瞬时点源扩散方程:

$$\begin{array}{c} \nabla_{b}^{2} \overline{\gamma} - s \overline{\gamma} = -\delta(M_{D}, M_{D}') \\ \frac{\partial \overline{\gamma}}{\partial n} = 0 \qquad z = 0, z = z_{e} \\ \overline{\gamma} = 0 \qquad r = r_{e} \\ \hline \overline{\gamma} = 0 \qquad r = r_{e} \\ \hline \overline{\gamma} = 0 \qquad \sigma = \overline{\gamma} \\ M_{D} \longrightarrow \overline{\beta} \quad \overline{\beta} \\ M_{D} \longrightarrow \overline{\beta} \quad \overline{\beta} \\ M_{D} \longrightarrow \overline{\beta} \\ M_{D} \longrightarrow \overline{\beta} \\ \overline{\gamma} \\ \overline{\gamma} \longrightarrow \overline{\beta} \\ \overline{\gamma} \\ \overline{\gamma} \longrightarrow \overline{\beta} \\ \overline{\gamma} \\ \overline{\gamma} \\ \overline{\gamma} \longrightarrow \overline{\beta} \\ \overline{\gamma} \\$$

$$\bar{\gamma} = \frac{\exp(-\rho_D \sqrt{s})}{4\pi\rho_D}$$
(2)

式中 ρ_{D} —源点和响应点之间的距离,m。

通过镜像反映法可得到顶底封闭板状断层油藏 的基本解:

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{\exp\left[-\sqrt{s} \sqrt{R_D^2 + (z_D - z_D' - 2nz_{eD})^2}\right]}{\sqrt{R_D^2 + (z_D - z_D' - 2nz_{eD})^2}} + \frac{\exp\left[-\sqrt{s} \sqrt{R_D^2 + (z_D + z_D' - 2nz_{eD})^2}\right]}{\sqrt{R_D^2 + (z_D + z_D' - 2nz_{eD})^2}} \right\}$$
(3)

$$R_D^2 = (x_D - x'_D)^2 + (y_D - y'_D)^2$$

$$x_D = \frac{x}{l} \sqrt{\frac{k}{k_x}} \qquad y_D = \frac{y}{l} \sqrt{\frac{k}{k_y}}$$

$$z_D = \frac{z}{l} \sqrt{\frac{k}{k_z}} \qquad z_{eD} = \frac{z_e}{l} \sqrt{\frac{k}{k_z}}$$

式中 k——参考渗透率,µm²;

$$k_x, k_y, k_z$$
—— x, y, z 万间的零透率, μ m⁻;
 i_D ——无因次距离, $i=x, y, z, z_e, x', y', z'$ 。
利用泊松叠加公式将式(3)简化得:

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{2\pi z_{eD}} \left[K_0(R_D \sqrt{s}) + 2\sum_{n=1}^{\infty} K_0(R_D \sqrt{s + \frac{n^2 \pi^2}{z_{eD}^2}}) - \cos n \pi \frac{z_D}{z_{eD}} \cos n \pi \frac{z_D'}{z_{eD}} \right]$$
(4)

当顶底封闭板状油藏中存在断层时,在式(4)基础上,应用镜像反映理论^[6],对顶底封闭板状断层油藏进行镜像反映处理,获得点源基本解:

$$\frac{\exp[-\sqrt{s} \sqrt{R'_{D}^{2} + (z_{D} + z_{D}' - 2nz_{eD})^{2}}]}{\sqrt{R'_{D}^{2} + (z_{D} + z_{D}' - 2nz_{eD})^{2}}} + \frac{\exp[-\sqrt{s} \sqrt{R'_{D}^{2} + (z_{D} + z_{D}' - 2nz_{eD})^{2}}]}{\sqrt{R'_{D}^{2} + (z_{D} + z_{D}' - 2nz_{eD})^{2}}} \right\}$$
(5)
$$R_{D}^{2} = (x_{D} - x'_{D})^{2} + (y_{D} - y'_{D})^{2}$$
$$R'_{D}^{2} = (x_{D} - x''_{D})^{2} + (y_{D} - y''_{D})^{2}$$
$$x_{D} = \frac{x}{l} \sqrt{\frac{k}{k}} \quad y_{D} = \frac{y}{l} \sqrt{\frac{k}{k}}$$

$$x_D = \frac{z}{l} \sqrt{\frac{k}{k_z}} \qquad z_{eD} = \frac{z_e}{l} \sqrt{\frac{k}{k_z}}$$

利用泊松叠加公式,式(5)可转化为:

$$\overline{\gamma} = \frac{1}{2\pi z_{eD}} \{ K_0(R_D \sqrt{s}) + K_0(R'_D \sqrt{s}) + 2\sum_{n=1}^{\infty} \left[K_0(R_D \sqrt{s + \frac{n^2 \pi^2}{z_{eD}^2}}) + K_0(R'_D \sqrt{s + \frac{n^2 \pi^2}{z_{eD}^2}}) \right] \\ \cos n\pi \frac{z_D}{z_{eD}} \cos n\pi \frac{z_D'}{z_{eD}} \}$$
(6)

式中 K₀——0 阶贝塞尔函数。

2 斜井试井模型及分析解

如图 1 所示,假设斜井长度为 2*l*,斜井位于 xoz 平面,流体通过一个线源流入或流出,线源与 z 轴的夹角为 θ,斜井的射孔段厚度为 z_e,斜井中心在 z 轴上,坐标为(0,0,z₀),中心距断层的距离为 L。



图 1 断层油藏中斜井试井模型示意图

沿斜井轨迹在区间(-lsinθ,lsinθ)对 x 进行积分, 可以得到顶底封闭板状断层油藏斜井的压力响应函 数,通过引入无因次压力:

$$\overline{p_D}(x_D, y_D, z_D) = \frac{4\pi k z_e}{q\mu} \left[\overline{p_i - p(x, y, z, t)} \right]$$

式中 q——斜井的产量,m³/d;

pi——原始地层压力, MPa;

最终可获得顶底封闭边界斜井无因次压力响应 函数: 62 天然气与石油 2012 年 10 月

$$\overline{p_{D}}(x_{D}, y_{D}, z_{D}) = \frac{1}{s \cdot \sin\theta} \left\{ \int_{-\sin\theta}^{\sin\theta} K_{0}(R_{D}\sqrt{s}) + K_{0}(R'_{D}\sqrt{s}) \right\}$$
$$dx_{D}' + 2 \int_{-\sin\theta}^{\sin\theta} \sum_{n=2,4,6...}^{\infty} (-1)^{n/2} \left[K_{0}(R_{D}\sqrt{s + \frac{n^{2}\pi^{2}}{z_{eD}^{2}}}) + K_{0}(R'D\sqrt{s + \frac{n^{2}\pi^{2}}{z_{eD}^{2}}}) \right] \cos(n\pi \frac{\cot\theta \cdot x_{D}'}{z_{eD}} + \frac{1}{2}) dx_{D}' \right\}$$
(7)

通过杜哈美叠加原理^[7-8],可以考虑井筒储集效应 和表皮效应的影响:

$$\overline{P_{uD}} = \frac{sp_D + s_m}{s + C_D s^2 (sp_D + s_m)}$$
式中 $s_m \longrightarrow$ 表皮系数;

 $C_D \longrightarrow$ 无因次并简储集系数。

3 渗流特征及影响因素分析

图 2 给出了顶底封闭板状断层油藏斜井的井底 压力和压力导数典型双对数曲线,从曲线可看出,井 底压力动态呈现四个明显的流动阶段。





a)早期纯井筒储集阶段,在压力和压力导数典型 双对数曲线上表现为斜率为1的直线段,该阶段主要表 现为压力和压力导数曲线受早期井筒储集效应的影响。

b) 第一径向流动阶段,在双对数曲线上,压力导数曲线出现第一水平段,该阶段反映了早期垂直于斜井井壁的径向流动,井斜角越大,该段越接近于水平井的第一径向流阶段特征。

c)中期径向流动阶段,在双对数曲线上,压力导数曲线出现第三水平段,值为 0.5,该阶段反映了早期 水平方向的径向流动阶段。

d)晚期断层边界反映阶段,在双对数曲线上,压 力导数曲线水平线由 0.5 变为 1,该阶段反映了断层 对压力和压力导数曲线的影响。

图 3 反映了斜井中心到断层的距离对井底压力 响应曲线的影响,从图 3 可知,斜井中心到断层的距 离越大,反映断层影响的压力导数曲线出现的时间越



图 3 斜井中心到断层的距离对井底压力的影响曲线

晚,这是因为斜井中心到断层的距离越大,压力波传 播到断层所需的时间越长。

图 4 反映了不同井斜角度对井底压力响应曲线 的影响,从图 4 可看出,井斜角越大,压力导数早期水 平段的值越小。在角度较小时,双对数曲线呈现出直 井的特征,特别是井筒储集效应和表皮效应较大时, 第一径向流阶段就更难观测到。随着井斜角逐渐增 大,双对数曲线逐渐呈现出水平井的特征,井斜角越 大,断层在双对数曲线上的反映时间也越早。



4 结论

a)利用杜哈美叠加原理、镜像反映原理和 Stehfest 反演算法,建立了顶底封闭板状断层油藏斜井 渗流数学模型,其渗流特征可分为四个流动阶段:早 期井筒储集阶段、第一径向流动阶段、中期径向流动 阶段和晚期断层边界反映阶段。

b) 斜井中心到断层的距离和不同的井斜角度对 井底压力响应图版产生不同程度的影响。斜井中心到 断层的距离越大,断层影响的压力导数曲线出现的时 间越晚,井斜角越大,断层在双对数曲线上的反映时 间也越早。

参考文献:

 ^[1] Cinco L H. Unsteady-state Pressure Distribution Created by a Directionally Drilled Well [J]. JPT, 1975, 4(2):1392-1400.

- (上接第62页)
- [2] Abbaszadeh M, Hegeman P S. Pressure-transient Analysis for a Slanted Well in a Reservoir with Vertical Pressure Sup-port[J]. SPEFE, 1990, 2(3):277–284.
- [3] 廖新维, 孙瑞东, 顾岱鸿. 斜井井底压力特征分析及解释图 版研制[J]. 断块油气田, 1997, 4(5): 36-41.
- [4] Ozkan E, Raghavan R. A Computationally Efficient Transient Pressure Solution for Inclined Wells [J]. SPE Reser-voir Eval, &Eng, 2000, 3(5):414-425.
- [5] Ozkan E, Raghavan R. New Solutions for Well-test Analysis Problems: Part Analytical Considerations [J]. SPEFE, 1991, 6

(3):359-368.

- [6] 葛家里. 现代油藏渗流力学原理(上册)[M]. 北京:石油工 业出版社,2003,108-114.
- [7] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 北京: 中国科技大学出版社, 2010:325-333.
- [8] 李全勇,李顺初,李 伟,等.基于解的相似结构的均质油藏
 渗流模型[J]. 天然气与石油,2011,29(2):40-42.
- [9] 张小龙,李晓平,谢维扬,等. 不同泄油体模式下水平井产能 方程分析[J]. 天然气与石油,2012,30(2):45-48.