

【引著格式】赵洪绪. 分支水平井试井解释研究中存在的问题及应用分析 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (7+8): 36~39.

分支水平井试井解释研究中存在的问题及应用分析

赵洪绪 (中法渤海地质服务有限公司, 天津 300452)

【摘要】分支水平井井身结构复杂, 压力求解的方法涉及复杂的数学问题, 理论的研究有一定进展, 实际应用的解释模型都做了相应的假设且与实际的分支水平井复杂情况有一定差别, 对分支水平井实际应用中的试井解释开展的不够理想; 分支水平井试井解释, 目前广泛使用 Ecrin 试井解释软件中的 Saphir 模块进行解释, Saphir 模块存在不能对分支水平井的压力动态进行准确描述的问题, 特别是非均质程度较严重且水平分支段较复杂的作业井, 软件中的模型往往与实际的地质情况有一定区别, 只能近似处理; 由于分支水平井试井解释本身具有复杂性和多解性, 建立符合实际的解释模型是目前分支水平井试井解释需要不断完善和认识的, 需要研究不同类型的分支水平井储层特征和影响因素, 研究相应的解释方法, 编写解释程序, 制定适合实际的分支水平井试井解释模型。

【关键词】分支水平井; 试井解释; Saphir; 解释模型

【中图分类号】TE353 【文献标志码】A 【文章编号】1000-9752 (2015) 07+08-0036-04

随着钻井技术的不断完善, 对一些薄层气田、河道砂岩和特殊类型油气藏的开发已使用分支水平井钻井方法, 分支水平井与油气藏的接触面积较大, 从根本上改变了流体在地下的流动情况, 很大程度地提高了单井产能值^[1]。

试井解释中任何理论模型都包括 3 个部分^[2]: 基础模型、内边界条件和外边界条件。分支水平井井身结构复杂, 给其压力求解带来了一定的困难; 目前对分支水平井不稳定渗流求解在理论上已有很多研究, 但在实际的试井解释软件应用中, 应用的解释模型都做了相应的假设且与实际的分支水平井复杂情况有一定差别, 对分支水平井实际应用中的试井解释开展的不够理想。

1 分支水平井试井解释理论研究进展

众多国内外学者对分支水平井不稳定渗流的求解问题进行了大量深入的研究^[3~5], 提出了求解分支水平井压力动态的方法。分支水平井压力求解的方法涉及许多相当复杂的数学问题, 详细的推导及求解本文不做论述, 只说明基本的方法及一般过程。

1.1 点源函数

在求解不稳定渗流问题时, 采用点源函数。Gringarten^[6]给出了无限大油藏 (平面上、纵向上均是无限大的) 瞬时点源的压力表达式:

$$\Delta p(M, \tau) = \frac{q}{8(\pi^3 \eta_r^2 \eta_z \tau^3)^{\frac{1}{2}} \phi C_i} \exp \left\{ -\frac{1}{4\tau} \left[\frac{r_1^2 + r^2 + 2rr_1 \cos(\theta - \theta_1)}{\eta_r} + \frac{(z - z_1)^2}{\eta_z} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: (r_1, θ_1, z_1) 为点源 p 的柱坐标; (r, θ, z) 为油层中任一点 M 的柱坐标; $\Delta p(M, \tau)$ 为油层中任一点 M 处的瞬时压力降, MPa; q 为点源的强度, m^3/d ; ϕ 为孔隙度, 1; C_i 为油藏的综合压缩系数, MPa^{-1} ; $\eta_r = \frac{K}{\phi \mu C_i}$ 为油藏平面上的导压系数, $(\text{mD} \cdot \text{MPa}) / (\text{mPa} \cdot \text{s})$; $\eta_z = \frac{K_z}{\phi \mu C_i}$ 为油藏纵向上的导压系数, $(\text{mD} \cdot \text{MPa}) / (\text{mPa} \cdot \text{s})$; K 为油层平面上的渗透率, mD; K_z 为油层纵向上的渗透率, mD; μ 为地层流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

【收稿日期】2014-11-05

【基金项目】国家科技重大专项 (2011ZX05017-001)。

【作者简介】赵洪绪 (1980-), 男, 工程师, 现主要从事试井和生产测井等方面的研究工作, zhaohx@cfbgc.com。

1.2 无限大板状油藏分支水平井压力求解方法

由于所研究的油藏问题在纵向上不是无限大的, 不能直接应用无限空间的点源函数, 可根据镜像映射方法及叠加原理来求得任意形状的油藏在任意点产生的压力降。一般推导过程为: ①由于无限大板状油藏上下边界是不渗透的, 应用镜像原理消除边界的影响, 使其在纵向上成为无限大空间油藏; ②线源^[7]可堪称由无限点源组成, 得到线源上的任一点源在 M 处的瞬时压力降, 对水平段长度进行积分, 可得到一条线源的瞬时压力降; ③所有线源 T 时刻在 M 处的瞬时压力降和在 0 到 T 时间内在 M 处产生的总压降可应用叠加原理; 由于所有源在 0~ T 时间内是连续作用的, 对时间进行积分可得到所有线源在 0~ T 时间内在 M 处产生的总压力降。使用叠加原理可得到水平段 p_h 及各分支段 p_j 的总压力降:

$$p = \sum_{j=1}^n p_j + p_h \quad (2)$$

式中: p 为总压力降, MPa; p_j 为分支段压力降, MPa; p_h 为水平段压力降, MPa。

2 目前分支水平井试井解释问题

分支水平井试井模型与一般水平井试井曲线相似, 在无限大地层中, 分支水平井流动的流线几何形状依次出现 3 种典型流态: 垂直径向流、线性流、水平径向流, 相应的压力及压力导数曲线, 如图 1 所示。3 种典型流态是分支水平井试井分析的特征曲线, 可判断测试数据的有效性, 识别流动阶段, 对试井资料是否可用于求取地层参数有重要帮助。由于分支段及水平段的影响, 早期渗流形态很难分辨, 但线性流动阶段和晚期拟径向流动阶段总存在。

2.1 关于扩展模型问题

试井解释一般基于压降或压力恢复测试数据来获得地层参数, 普遍使用法国 KAPPA 公司开发的试井解释软件 Ecrin 中的 Saphir 模块^[8]。Saphir 软件中包含了分支水平井 (Multi-branched horizontal well) 的扩展解释模型, 例如水平段上分支的对数为 3, 水平段与分支段角度为 45° , 使用 Saphir 模型对分支水平井进行试井解释 (图 2), 但扩展模型有一定的限制: ①水平主井段上的分支是成对出现的, 且对分支的描述相同; ②分支段对称且等间距的分布在水平主井段的两侧; ③油藏模型为均质油藏, 双重孔隙介质油藏、双重渗透介质油藏和复合油藏模型不可选择; ④油藏边界类型为无限大, 无法添加其他不渗透边界和阻流边界。

Saphir 中的扩展模型基本可以描述分支水平井的分支情况, 但对较复杂的水平分支情况及分支数不是呈对数增加的, 解释模型的解释将不够清楚, Saphir 软件中的扩展模型关于分支水平井在油藏中的位

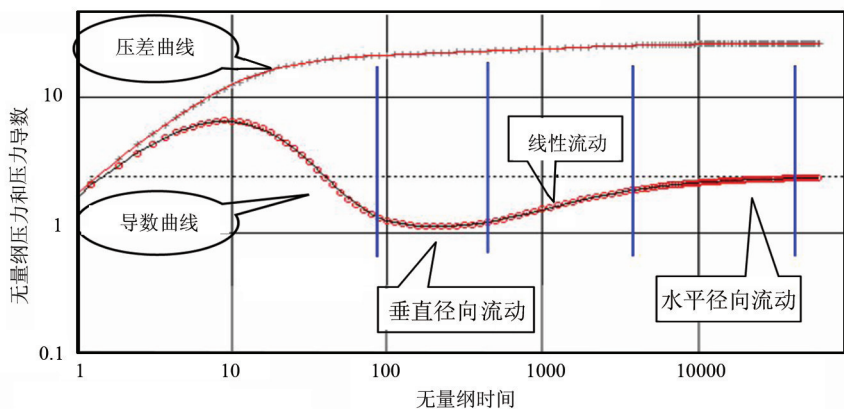
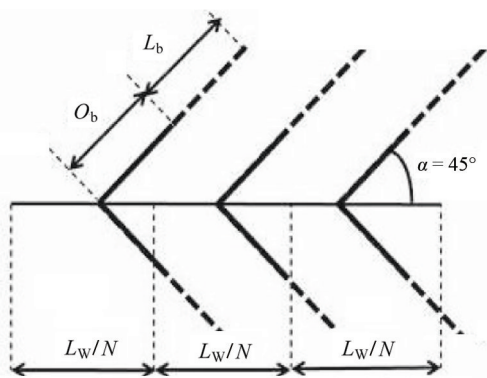


图 1 分支水平井压力与压力导数典型曲线



注: L_w 为水平段长度; N 为水平段上分支的对数; L_b 为分支段射开的长度; O_b 为分支段未射开的长度; α 为水平段与分支段的角。

图 2 分支水平井试井模型

置、分支情况和油藏边界类型等方面的描述不够准确。因此,对于复杂油气藏以及存在边界的油藏,使用扩展模型解释得到的解释结果将存在一定的局限性。

2.2 关于特征曲线的问题

分支水平井扩展模型中,将分支井的分支对数增加,使用相同井下压力恢复数据分析,将不同分支对数的试井特征曲线进行对比,形成图3;随着分支对数的增加,1/2单位斜率直线的时间范围增大,第一导数稳定段位置与分支对数呈反比,导数位置下降;水平段分支对数越少,线性流前的

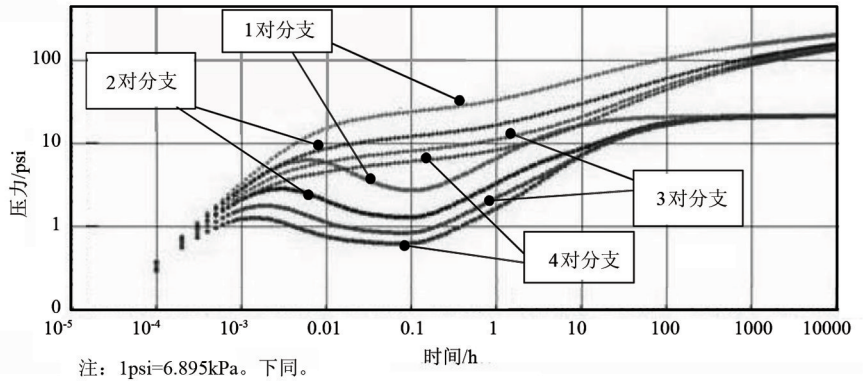


图3 分支水平井分支数量的敏感性分析

导数曲线上移;不同分支对数的分支水平井解释曲线,晚期曲线形状基本相似,晚期径向流基本重合。

当水平段压力降低时,井筒周围的流体径向流入井内,油层的主要流动是垂直截面上的径向流动,即垂直径向流,持续时间一般取决于储集层的厚度。在产层的顶面和底面影响都到达测试井后,流动即进入线性流动阶段,压差及其导数曲线均呈斜率为0.5的直线。当水平井段长度与油层厚度之比相当大时,这一阶段会明显出现,而且历时相当长。当流动的影响扩大到分支水平井之外,进入到油层的广大范围之后,分支水平井可以看成一“点”^[9],油从四面八方近似于径向地流向分支水平井“点”,类似于直井的无限作用平面径向流动,这一阶段称为“后期拟径向流动阶段”。

分支水平井钻遇的储层常常起伏不定,有时储层非均质较严重,需要对油藏的类型进行准确描述才能得到接近真实的结果;试井解释本身存在多解性,应用软件中的分支水平井扩展解释模型进行解释,存在不能对分支水平井的压力动态进行准确描述的问题,特征曲线的趋势基本一致,但在全程的压力历史拟合和特征曲线的拟合情况不是十分理想。扩展解释模型对于油藏类型的选择只限于均质油藏且不能够对边界进行描述,解释结果会存在一定的偏差。

3 Saphir 扩展模型应用分析

油气田现场实际完钻了大量的分支水平井,由于测试手段的限制及测试资料质量的影响,难以见到比较典型的实例分析。A井是某油气田一口分支水平生产气井,其基本参数:储层温度为91.2℃,储层压力为19.99MPa,井眼半径为0.108m,孔隙度为0.13,有效厚度为25m,天然气相对密度为0.73,水平段长度为650m,2条分支长度分别为210m和260m,综合压缩系数为0.0538061MPa⁻¹。

利用Saphir模块中的扩展模型对分支水平井实测资料进行解释:由实测压力数据绘制双对数图,采用模块中的扩展模型典型图版进行拟合,计算表皮系数^[10]、井筒储集系数、渗透率、地层压力、等效水平段长度^[11]等参数。

由于实际的分支水平井井眼轨迹复杂且储层存在一定的非均质性,软件的扩展模型与实际的地质情况有所不同。A井试井解释的理论模型压力历史和实际压力历史(图4)基本相符,解释结果与静态的地质认识基本相符,但不是十分理想;从试井曲线分析(图5):垂直径向流、线性流2个流动阶段较清晰,垂直径向流阶段明显,分支长度较长;由于各分支水平段、主水平段以及地层渗透率较低原因的多重作用,后期的试井曲线异常,晚期的拟径向流阶段很难分辨,同时受水平段较长且分支段的实际情况影响,同一时间下其压力降落就变的较小,在相同生产条件下,地层达到晚期拟径向流需要的时间将越长。从试井曲线可以看出,扩展模型的拟合效果一般,主要原因是扩展模型与实际的地质情况有差别,与理论方面的研究相比还有需要完善的地方。

综合考虑上述问题,可以建立相应的研究分支水平井渗流规律的物理模型和数学模型。对于上下有

界水平方向无限大的平板状油藏，将油藏中的一个点源映射成无限区域中的无限多个点源，采用相应函数、镜像原理及叠加原理推导任一条线源的压力公式；应用现代试井理论，以渗流力学为基础，重点研究不同类型的分支水平井储层的特征，考虑影响因素，分析不同完井方式和储层改造措施对分支水平井试井模型的影响，建立分支水平井的物理模型和数学模型，研究出相应的解释方法，编写解释程序，制定适合实际的分支水平井试井解释模型，提高试井资料的解释精度和准确性。

4 结语

1) 由于分支水平井试井解释本身具有复杂性和多解性，难度很大，特别是非均质程度较严重且水平分支段较复杂的作业井，目前的试井解释软件不能对其进行准确描述，只能用相应的扩展模型进行近似处理，软件中的模型往往与实际的地质情况有一定区别，解释结果会存在一定的偏差。

2) 建立符合实际的模型需要研究不同类型的分支水平井储层特征和影响因素，研究相应的解释方法，编写解释程序，制定适合实际的分支水平井试井解释模型。

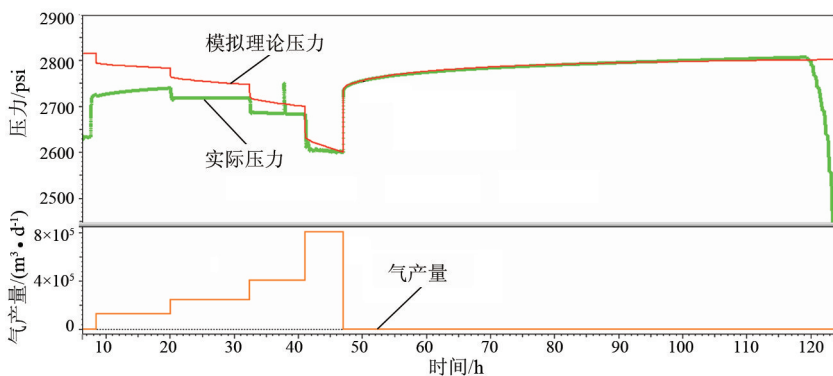


图 4 某油田一口分支水平井压力历史拟合图

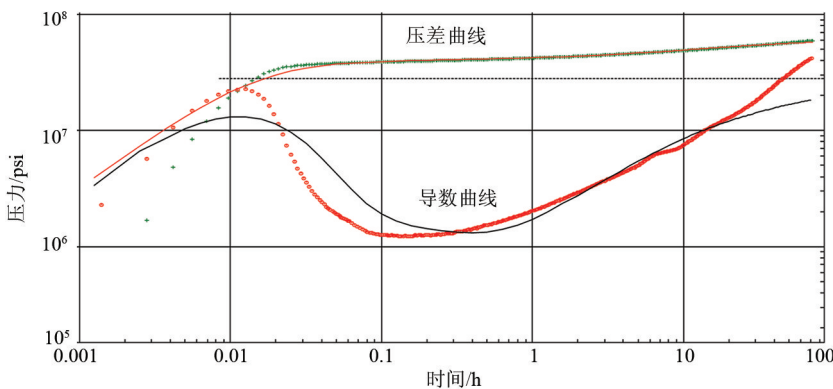


图 5 某油田一口分支水平井实测压力与典型曲线拟合图

[参考文献]

- [1] 庄惠农. 气藏动态描述和试井 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [2] 刘能强. 实用现代试井解释方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [3] Kong X Y, Xu X Z, Lu T D. Pressure transient analysis for horizontal well and multi-branched horizontal wells [J]. SPE 37069, 1996.
- [4] 王晓冬, 刘慈群. 分枝水平井三维不定常渗流研究 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 1997, 21 (2): 43~45, 49.
- [5] Medeiros F, Ozkan E, Kazemi H. A semianalytical, pressure-transient model for horizontal and multilateral wells in composite, layered, and compartmentalized reservoirs [J]. SPE102834, 2006.
- [6] Gringarten A C, Henry R J. The use of source and green's function in solving unsteady flow problem in reservoirs [J]. SPE3818, 1973.
- [7] Odeh A S, Babu D K. Transient flow behavior of horizontal wells pressure drawdown and buildup analysis [J]. SPE18802, 1989.
- [8] 《试井手册》编写组. 试井手册 (下册) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [9] 张利军, 程时清. 分支水平井试井压力分析 [J]. 石油钻探技术, 2009, 37 (1): 23~28.
- [10] 陈元千, 闫为格. 表皮系数的分解方法 [J]. 断块油气田, 2003, 10 (6): 32~35.
- [11] 刘斌, 程时清, 聂向荣, 等. 用等效水平段长度评价水平井损害程度 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40 (3): 352~356.