

特高含水期油田的优势渗流通道 预警及差异化调整策略

姜汉桥

(中国石油大学石油工程学院,北京 102249)

摘要:针对特高含水期油藏发育优势渗流通道所引起的主要生产矛盾,根据优势渗流通道的潜在地质特征和动态形成特征,从不同角度给出优势渗流通道的概念,应用预警理论和油藏工程原理,建立优势渗流通道的预警模型和不同发育级别优势渗流通道的动态判别方法,用以识别特高含水期油藏中优势渗流通道严重发育、一般发育和不发育三个级别的区域分布。通过数值模拟研究,给出了治理不同发育级别优势渗流通道的深部封窜方法和深部调驱方法的条件和界限;基于封窜和调驱的见效机制和效果构成研究,揭示了治理优势渗流通道后的有效驱替接替方式是发挥封窜和调驱潜力的技术关键;在此基础上,提出了具有优势渗流通道的特高含水期油藏差异化精细调整策略。

关键词:油藏;优势渗流通道;预警方法;差异化调整

中图分类号:TE 34 **文献标志码:**A

Early-warning and differentiated adjustment methods for channeling in oil reservoirs at ultra-high water cut stage

JIANG Han-qiao

(College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Channels with very high permeability can be developed in oil reservoirs at ultra-high water cut stage. In this study, different types of channeling problems were identified and described according to the geological characteristics of the reservoir and the dynamics of channel forming. An early warning and discriminating model for the detection of channeling was proposed based on the theory of early warning and the principles of reservoir engineering. The model can be used to identify various channels and their distribution in the reservoir, and the channels are differentiated as severely, normally and less-developed according to their flow conductivities. Water shut-off and conformance control methods were proposed for different types of the channels and their performance and application conditions were assessed using a numerical simulation model. The results show that, after the water shut-off or conformance control treatments, the selection of the subsequent or alternative flooding mode is very important to enhance the effectiveness of the channel blockage and control technique. Finally, a differentiated and fine adjustment strategy for controlling the channeling problems was proposed, which can be used for mature oil reservoirs at ultra-high water cut stage.

Key words: reservoir; channeling; early-warning method; differentiated adjustment

特高含水期油藏的优势渗流通道的形成和发育严重影响油田的水驱开发效果,由于特高含水期油藏中的不同井区或区域的平面非均质性以及开发条件的差异性,导致不同区域的优势渗流通道发育程度不一致。不同发育级别的优势渗流通道的地质特征、窜流特征和剩余油分布特征等差异较大。因此,单一的治理方式对改善油藏整体开发效果具有很大

的局限性。笔者开展不同级别优势渗流通道的判别方法、治理方法以及相适应的油藏精细化调控方法的综合研究。

1 优势渗流通道的概念及动态特征

1.1 优势渗流通道的概念

油田进入特高含水期,储层原有的非均质性随着

水驱冲刷被进一步恶化,储层孔隙结构加剧变化^[14],在储层中形成次生高渗透条带,即优势渗流通道,也常被称为大孔道或窜流通道。归纳起来,可以从以下3个方面给出有关优势渗流通道的定义及概念。

(1)存在角度。优势渗流通道是储层中高孔隙度、高渗透率的部位,或者是储层中特高渗透条带。

(2)形成角度。优势渗流通道是储层经过长期水驱冲刷,使孔道增大,渗透率变高,形成的优势渗流通道。

(3)应用角度。根据治理的方法,定义优势渗流通道的孔道级别。如孔道直径超过 30 μm 的为孔道,孔道直径超过 100 μm 的为特大孔道。

实际上不同的定义方法给出了优势渗流通道的判别方法的不同思路。从存在的角度可以建立静态判别方法,即优势渗流通道潜在的静态特征;从形成的角度可以建立动态判别方法,即优势渗流通道的多因素综合动态特征;从应用的角度可以建立量化判别方法,即优势渗流通道的不同级别孔道的量化特征,以适应不同的封堵技术。

1.2 优势渗流通道的动态特征

1.2.1 油井含水构成状况

从整个水驱开发油田来看,随着优势渗流通道的形成和发育,生产井的含水率不断上升,其中高含水 and 特高含水生产井所占比例较高。为了保持产量稳定,随着生产井高含水,将伴随着生产井高产液。

1.2.2 水井注入量构成状况

油田进入高含水期,随着油田处于高产液,注水井的注入量将不断增加,单井注水量大于平均值

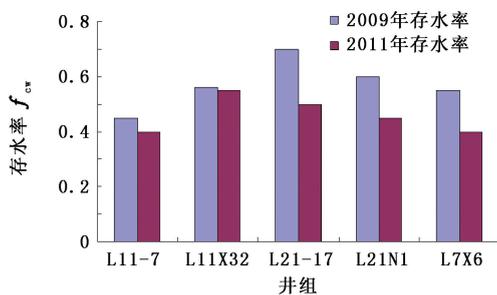


图2 井组存在优势渗流通道后的动态特征

Fig.2 Well group dynamic characteristics of developing percolation channeling

另外,特高含水期的一些监测或测试资料也反映出明显的优势渗流通道形成和发育特征。

2 优势渗流通道的动态判别预警方法

目前利用生产动态资料综合判别优势渗流通道

50%的注水井所占比例较高。由于优势渗流通道的形成和发育,注水井的高注入量将伴随着高吸水能力。

1.2.3 注水井吸水能力增大

注水井高注入量伴随着高吸水能力意味着视吸水指数不断增加,可以用比视吸水指数表示,比视吸水指数=初期视吸水指数/目前视吸水指数。

在高注入量的注水井中,大部分水井的比视吸水指数小于1,部分水井吸水能力大幅增加。

1.2.4 油井采液能力增大

在高含水或特高含水期,随着采液速度上升,产液能力急剧上升。一般说来,含水率大于90%以后,实际采液指数上升速度比理论值高20%~50%,实际采液指数变化曲线如图1所示。

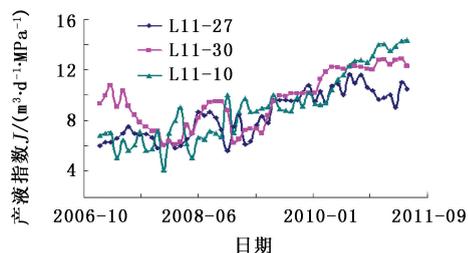
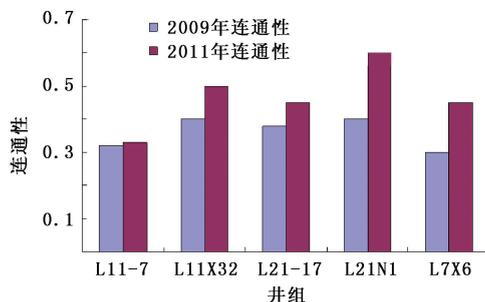


图1 产液能力变化曲线

Fig.1 Curves of producing capacity

1.2.5 井组窜流特征

在阶段累积注采比接近的条件下,统计分析两个阶段的存水率和动态连通性,如图2所示。当存在优势渗流通道窜流特征时,部分井组存水率下降;相应的油水井间的动态连通性增强。



的方法较多。本文应用预警的思想和原理^[5-7],给出优势渗流通道的动静态多指标判别预警方法。从逻辑上讲,分析某领域的预警步骤为明确警义、寻找警源、分析警兆、预报警度和对策措施。优势渗流通道判别预警方法的思路如图3所示。

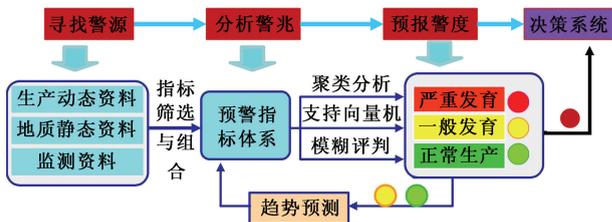


图3 优势渗流通道判别预警流程

Fig.3 Flow chart of percolation channeling early-warning method

2.1 判别预警指标体系

利用现场动态、地质和监测资料判别预警指标体系,指标体系分为影响因素和表现特征。

影响因素包括:孔隙度、渗透率、泥质含量、胶结程度、原油黏度、储层岩性、油层厚度、非均质性、沉积韵律、隔夹层分布、静态连通性以及累积产液量、累积注入量等。

表现特征包括:注入井注入压力、吸水指数、注水速度、注水强度和吸水剖面;采油井含水率、含水上升率、产液指数、产液剖面、出砂程度和产液强度;井组注采压差、产液速度、存水率和注采连通性等。

在实际应用中,通过评价优势渗流通道发育的主控因素,对全指标体系进行筛选和确定。

2.2 判别预警模型

通过研究分析,在优势渗流通道判别预警中较适宜的判别预警模型包括模糊综合评判、支持向量机和模糊综合聚类3类。这3类模型具有各自的优缺点和适应性条件。

考虑到支持向量机算法中的核函数具有将空间非线性样本映射到高维空间呈线性分布的特征,将核函数引入到模糊聚类的计算中,可以克服优势渗流通道预警指标数据分布特征不稳定的缺陷。因此,支持向量机和模糊综合聚类预警模型中,核函数的确定至关重要。目前常用的多项式或径向基等核函数^[8-11]各自存在优点和缺陷,为扬长避短,构造新的复合核函数,

$$K(x_i, x_j) = n_1(x_i x_j + 1)^q + n_2 \exp\left(-\frac{|x_i - x_j|^2}{\sigma^2}\right) + n_3 \tan h(v(x_i x_j) + c). \quad (1)$$

式中, $K(x_i, x_j)$ 为新的符合核函数; $(x_i x_j + 1)^q$ 为阶次为 q 的多项式核函数; $\exp\left(-\frac{|x_i - x_j|^2}{\sigma^2}\right)$ 为径向基核函数; $\tan h(v(x_i x_j) + c)$ 为Sigmoid核函数。

2.3 警度指标界限确定

不同发育程度的优势渗流通道的技术界限(即

警度界限)的确定是个复杂的问题,在多指标影响条件下,其确定难度更大。本文中主要对水驱和化学驱两种条件下的警度指标界限确定原理与方法进行研究。

(1)水驱优势渗流通道的警度确定。在水驱阶段,利用层次分析法确定水驱优势渗流通道的警度,根据目标区块的实际动静态资料建立典型模型,模拟各指标变化条件下的含水率和产量变化情况,得到各指标的不同警度界限。在此基础上得到优势渗流通道的综合判度^[12],即

$$F_z = [F_{z1}, F_{z2}, F_{z3}]. \quad (2)$$

其中

$$F_{zi} = F_{ai} \omega_a + F_{bi} \omega_b.$$

式中, F_z 为优势渗流通道的综合判度; F_{ai} 为影响判度; F_{bi} 为特征判度; ω_a 和 ω_b 分别为 F_{ai} 和 F_{bi} 的权值。

若 $F_{z1} = \max\{F_{z1}, F_{z2}, F_{z3}\}$,地层中优势渗流通道严重,若 $F_{z2} = \max\{F_{z1}, F_{z2}, F_{z3}\}$,地层中优势渗流通道发育;若 $F_{z3} = \max\{F_{z1}, F_{z2}, F_{z3}\}$,地层中不存在大孔道。从而得到水驱阶段的不同级别优势渗流通道的判别警度。

(2)化学驱优势渗流通道的警度确定。化学驱与水驱阶段优势渗流通道警度的不同在于,化学驱要考虑其特有的指标警度,采用模糊综合评判法建立其优势渗流通道警度。根据实际区块的化学驱注采状况建立概念模型,模拟各影响因素与见效后含水变化率关系,确定各指标的优势渗流通道不同级别界限,利用二级模糊综合评判模型(图4),最终确定化学驱优势渗流通道不同级别的综合警度。

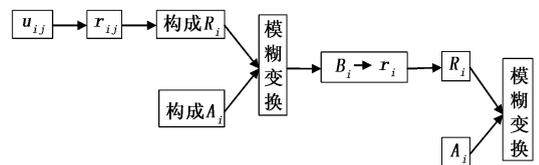


图4 两级模糊综合评判框图

Fig.4 Flow chart of two level fuzzy comprehensive evaluation

2.4 主窜流方向确定

在优势渗流通道发育井区判断主窜流方向本质上是判断该区域油水井间的关联性,提出一种利用多元线性回归求解的电容模型,综合运用生产动态数据资料,求解该模型的关联系数可以较准确地得到优势渗流通道发育井区中油水井间主窜流方向。实际油藏中会有很多注采井,一口生产井的产量会受到多口注水井的影响。电容模型可以用于描述一

口采油井和多口注水井的情况。引入权重系数 λ_{ij} 用来表示注水井的注水量在多口油井间的分配情况,可以表征对应油水井的连通程度。生产井 q 和注水井 i 的电容模型为

$$C_{ij} V_{p_{ij}} \frac{d\bar{p}_{ij}}{dt} = \lambda_{ij} i_i(t) - q_{ij}(t). \quad (3)$$

式中, C_{ij} 为综合压缩系数; $V_{p_{ij}}$ 为泄油坑道内的孔隙体积; \bar{p} 为地层平均压力; $i_i(t)$ 为水井单位时间注入量; q_{ij} 为油井单位时间产液量。

2.5 应用实例

某区块已水驱开发 20 多年,目前全区含水率大于 80% 的油井已经超过总井数的 1/2。由于长期注水冲刷作用,优势渗流通道在该区块发育。根据前面介绍的预警评判方法,各井区的优势渗流通道发育情况如图 5 所示。图中红色区域代表优势渗流通道发育很严重区域;黄色区域代表优势渗流通道一般发育区域,有待进一步监测;绿色区域代表不存在优势渗流通道区域,是安全生产井区。优势渗流通道发育严重井区(红色)中的箭头方向代表了主要窜流方向。

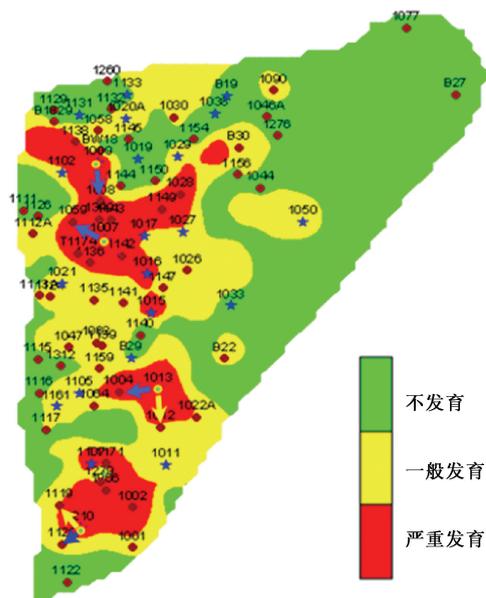


图 5 某区块优势渗流通道分布

Fig. 5 Channeling distribution of a block

3 差异化精细调整和挖潜策略

3.1 不同级别优势渗流通道的治理技术条件

对于油藏中存在发育的优势渗流通道,通常采用(凝胶类化学剂)深部调驱技术。实际上,不同发育级别的优势渗流通道具有相应的治理技术,即不同规模的优势渗流通道具有相应的适应性技术条

件。仅用凝胶调驱方法治理不同级别优势渗流通道的效果见图 6。

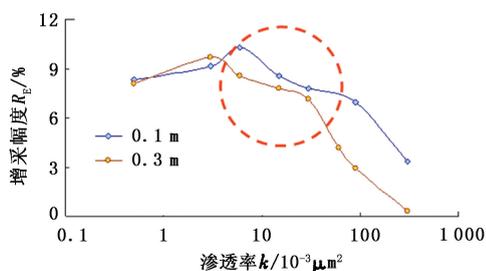


图 6 凝胶调驱效果随优势渗流通道规模变化的曲线

Fig. 6 Relationship between gel displacement effect and channeling scale

图 6 表明,在给定的高渗透油藏条件下,当优势渗流通道的渗透率在一定范围内(厚度小于 0.1 m 时,其渗透率小于 $35 \mu m^2$;当其厚度为 0.3 m 时,其渗透率小于 $15 \mu m^2$),凝胶调驱的增油效果比较明显,当优势渗流通道的规模超过凝胶的调驱能力时,该油藏不再适合这种调驱方式,但可以采用较高强度的堵剂对发育严重的优势渗流通道进行封窜。所以,不同发育级别的优势渗流通道有与其相适应的调控技术条件。

3.2 封窜/调驱后的有效接替驱替方式

在治理不同优势渗流通道时,当注入凝胶调驱段塞或高强度封窜段塞后,还要考虑到后续驱替方式的有效性和优化,即要考虑后续驱替方式对治理段塞的保护以及对油藏条件的适应性。图 7 为凝胶段塞驱替后核磁测试 T_2 谱曲线,反映了注入凝胶段塞及后续驱替的见效状况。从图 7 看出,发挥凝胶段塞的调驱作用主要依靠后续驱替段塞。因此,后续接替的段塞对此油藏条件的适应性以及与前置调驱段塞的适应性是发挥调驱效果的技术关键。

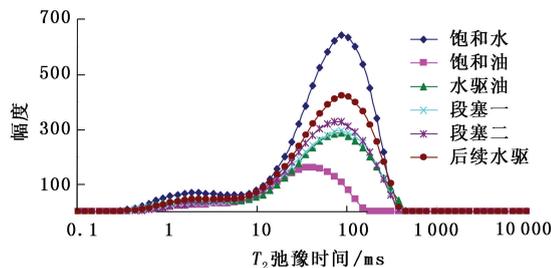


图 7 凝胶段塞驱替后核磁测试 T_2 谱

Fig. 7 T_2 spectrum of nuclear test after gel slug displacement

封窜/调驱后的有效接替驱替方式主要包括两个方面:与此时的油藏条件和封窜/调驱段塞有效运移相适应的驱替剂;在有效驱替条件下的工作制度

优化。

选择相适应的驱替剂是为了实现有效驱替。因此,根据油藏条件和段塞性能,使用和追加化学剂段塞。优化后续接替段塞工作制度是为了强化实现驱替均衡性,工作制度包括注入速度、注入压力、油藏压力保持水平以及注入量等。

3.3 差异化精细调整策略

高/特高含水期油田在发育有优势渗流通道的控制下,低效和无效注水驱替成为影响水驱开发效果的主要原因,原有的井网、层系和注采井工作制度组成的注采系统已不适应有效水驱开发,水驱波及和驱替效率受到较大影响。因此在针对性地治理不同级别优势渗流通道的基础上,对原有的注采系统进行调整,并配套挖潜措施,实现进一步提高特高含水期油田的水驱开发效果。特高含水期油藏差异化精细调整策略如下:

(1)优势渗流通道严重发育井区。在对水窜通道封窜基础上,对该井区的原有注采系统进行综合调整和配套挖潜措施,并赋予封窜后的有效接替方式,最终实现新的注采系统优化。

(2)优势渗流通道一般发育井区。在对优势渗流通道调驱基础上,对该井区的原有注采系统进行综合调整和配套挖潜措施,并赋予调驱后的有效接替方式,优化新的注采系统。

(3)优势渗流通道不发育井区。从水窜角度看是相对安全生产井区,只需对该井区的原有注采系统进行适应性分析和评价,适度进行水动力学方法调整和挖潜,优化注采井工作制度,实现注采系统优化。

4 结 论

(1)在高/特高含水油田,注水井的视吸水指数变化率、生产井产液能力上升率、井组的存水率和动态连通率等表征指标能较好地反映优势渗流通道发育的动态特征。

(2)基于优势渗流通道的动态特征,建立了高含水期优势渗流通道预警判别方法,以此为基础形成了不同发育级别的优势渗流通道判别与预警方法。

(3)不同发育级别的优势渗流通道具有不同的治理技术条件,深部封窜和深部调驱能适应于严重发育和一般发育的优势渗流通道。

(4)提出了具有不同发育级别优势渗流通道的特高含水期油田的差异化精细调整策略。

致谢 本文是以国家高技术研究发展计划及其他课题成果为基础形成的,王硕亮、李俊健、赵传峰、陈民锋、周元龙、叶双江、于群、刘凡、王川、白晓虎、林承峰等做了大量相关研究工作,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 冯其红,陈月明,姜汉桥. 区块整体调剖效果预测[J]. 石油大学学报:自然科学版,1997,21(4):30-36. FENG Qi-hong, CHEN Yue-ming, JIANG Han-qiao. Prediction of performance of profile control in block wide [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1997,21(4):30-36.
- [2] 赵福麟,王业飞,戴彩丽,等. 聚合物驱后提高采收率技术研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(1):86-89,101. ZHAO Fu-lin, WANG Ye-fei, DAI Cai-li, et al. Techniques of enhanced oil recovery after polymer flooding [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(1):86-89,101.
- [3] WANG Shuo-liang, JIANG Han-qiao. Determine level of thief channel using fuzzy ISODATA clustering method [J]. Transport in Porous Media, 2011(8):513-520.
- [4] 王海静,薛世峰,全兴华,等. 非均质油藏水平井射孔调剖方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(3):135-139. WANG Hai-jing, XUE Shi-feng, TONG Xing-hua, et al. Profile control method for perforated horizontal wells in heterogeneous reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(3):135-139.
- [5] 白晓虎,姜汉桥,王硕亮,等. 油田开发动态指标多步预测模型研究[J]. 断块油气田,2010,17(3):345-347,368. BAI Xiao-hu, JIANG Han-qiao, WANG Shuo-liang, et al. Multi-step forecasting model of dynamic index for oil-field development [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010,17(3):345-347,368.
- [6] JIANG Han-qiao, WANG Shuo-liang. Pre-warning and decision making of water breakthrough for higher water-cut oil field [J]. Advanced Materials Research, 2012(347-353):688-693.
- [7] 罗有刚. 油井生产动态预警研究[D]. 东营:中国石油大学石油工程学院,2009. LUO You-gang. The reasearch on early warning of well production performance [D]. Dongying: School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2009.
- [8] 周志广,李广杰. 边坡非线性位移的分段最小二乘一

- 时间序列分析[J]. 世界地质, 2007, 26(1): 102-107, 123.
- ZHOU Zhi-guang, LI Guang-jie. Segment least squares-time series analysis of slope nonlinear displacement[J]. Global Geology, 2007, 26(1): 102-107, 123.
- [9] 贾磊, 廖士中. 超核函数支持向量机[J]. 计算机科学, 2008, 35(12): 148-152.
- JIA Lei, LIAO Shi-zhong. Support vector machines with hyperkernel functions[J]. Computer Science, 2008, 35(12): 148-152.
- [10] SMITH M J, FLOWERS T H, COWLING M J, et al. Method for themeasurement of the diffusion coefficient of benzalkonium chloride [J]. Water Research, 2002, 36(6): 1423-1428.
- [11] 王长江, 姜汉桥, 陈民锋, 等. 基于支持向量机和聚类理论的储层评价方法研究[J]. 油气田地面工程, 2009, 28(2): 18-20.
- WANG Chang-jiang, JIANG Han-qiao, CHEN Min-feng, et al. Evaluation method research on reservoir formation based on support vector machine and clustering theory[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2009, 28(2): 18-20.
- [12] 单胜道, 俞劲炎. 模糊综合定级体系初探[J]. 浙江大学学报:理学版, 1999, 26(3): 99-104.
- SHAN Sheng-dao, YU Jin-yan. Study on the system of deciding cultivated land grades with blurred theory[J]. Journal of Zhejiang University(Sciences Edition), 1999, 26(3): 99-104.
- (编辑 李志芬)
-
- (上接第 113 页)
- [16] BROWN M, OZKAN E, RAGHAVAN R, et al. Practical solutions for pressure transient responses of fractured horizontal wells in unconventional reservoirs[R]. SPE 125043, 2009.
- [17] 李笑萍. 穿过多条垂直裂缝的水平井渗流问题及压降曲线[J]. 石油学报, 1996, 17(2): 91-97.
- LI Xiao-ping. Fluid flow through pay zones in relation to drawdown profiles in a horizontal well intersecting several vertical fractures[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(2): 91-97.
- [18] 刘振宇, 刘洋, 贺丽艳, 等. 人工压裂水平井研究综述[J]. 大庆石油学院学报, 2002, 26(4): 96-99.
- LIU Zhen-yu, LIU Yang, HE Li-yan, et al. Overview of the research of hydraulically fractured horizontal wells [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2002, 26(4): 96-99.
- [19] 李军诗. 压裂水平井动态分析研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 2005.
- LI Jun-shi. A study of performance analysis of horizontal wells with a single or multiple fractures[D]. Beijing: School of Earth Sciences and resources, China University of Geosciences(Beijing), 2005.
- [20] ZERZAR A, BETTAM Y. Interpretation of multiple hydraulically fractured horizontal wells in closed systems [R]. SPE 84888, 2003.
- [21] 姚军, 李爱芬. 单孔隙介质渗流问题的统一解[J]. 水动力学研究与进展, 1999, A辑, 14(3): 317-324.
- YAO Jun, LI Ai-fen. General solutions for seepage flow in single porous medium[J]. Journal of Hydrodynamics, 1999, Ser A, 14(3): 317-324.
- [22] 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.
- TONG Deng-ke, CHEN Qin-lei. Note on Stehfest method of Laplace numerical inversion [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(6): 91-92.
- [23] 吴明录, 姚军, 王子胜, 等. 利用双种群遗传算法进行数值试井自动拟合[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(2): 81-83.
- WU Ming-lu, YAO Jun, WANG Zi-sheng, et al. Numerical well testing auto-matching applying double population genetic algorithm[J]. PGRE, 2007, 14(2): 81-83.
- (编辑 修荣荣)